



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV POUŽITÍ SEKUNDÁRNÍ METALURGIE NA
VLASTNOSTI OCELI**

INFLUENCE OF USING THE SECONDARY METALLURGY ON STEEL PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Horymír Navrátil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Horymír Navrátil**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv použití sekundární metalurgie na vlastnosti oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tavení oceli na elektrických obloukových pecích je ve slévárnách oceli hojně rozšířeno, protože oblouková pec umožňuje taveninu odfosfořit, odsířit, odplynit a následně i dolegovat na téměř libovolné chemické složení. Výsledná jakost oceli vyrobené na obloukové peci splňuje požadavky na výrobu běžné oceli na odlitky. V případě požadavků na nižší koncentrace síry, vyšší stupeň odplynění nebo vyšší oxidickou čistotu oceli je nezbytné zpracování oceli na obloukové peci kombinovat s některým z prvků sekundární metalurgie. Metalurgické zpracování oceli na obloukové peci je v praxi často kombinováno se zpracováním na pánvové peci případně též s vakuovým zpracováním. V důsledku vyšší oxidické čistoty oceli i nižšího obsahu síry je dosahováno vyšších mechanických i plastických vlastností oceli. Aplikace postupů sekundární metalurgie je v současnosti zcela nezbytná při výrobě oceli na ingoty a masivní odlitky.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je popsat základní metody sekundární metalurgie a technologie používané při výrobě oceli na odlitky a ingoty. Dále popsat vliv použité sekundární metalurgie na výsledné chemické složení oceli a s ním související vlastnosti oceli.

Seznam literatury:

- Šenberger, J., Bůžek, Z., Záděra, A., Stránský, K., Kafka, V. (2008): Metalurgie oceli na odlitky. 1. Brno, Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium. 311 p. ISBN 978-80-214-3632-9.
- Čech, J. (2014): Vliv sekundární metalurgie na kvalitu ocelových odlitků. In Sborník přednášek z 51. slévarenských dnů, Blok A sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty. Brno: Česká slévarenská společnost. 11.–12. 2014. Brno, s. 5–11. ISBN 978-80-02-02566-5.

Fila, P. a kol. (2012): První zkušenosti s multifunkčním kopím ve ŽĐAS, a.s. In 49. slévárenské dny, Sborník přednášek – sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty. Brno: Česká slévárenská společnost. 6.–7. 2012. Brno, s. 37–42. ISBN 978-80-02-02405-7.

Carbol, Z., Machovčák, P. (2012): Sekundární metalurgie při výrobě masivních odlitků ve VHM a.s. In 49. slévárenské dny, Sborník přednášek – sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty. Brno: Česká slévárenská společnost. 6.–7. 2012. Brno, s. 18–22. ISBN 978-80-02-02405-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V této bakalářské práci jsou popsány metalurgické pochody při výrobě oceli v elektrické obloukové peci. Je zde popsána oxidační i redukční fáze tavby. Dále jsou popsány základní prvky sekundární metalurgie používané ve slévárnách oceli a možnosti jejich využití. Práce se také zabývá nečistotami v oceli, konkrétně nekovovými vměstky, plyny a stopovými prvky, s čímž souvisí i výsledné užité vlastnosti oceli. V této bakalářské práci byly blíže popsány technologické vlastnosti oceli. Popsán byl i vliv několika vybraných prvků na vlastnosti oceli. Byl zde zhodnocen vliv sekundární metalurgie na objem vad v ocelových odlitcích, na mechanické vlastnosti a na výsledné chemické složení.

Klíčová slova

ocel, sekundární metalurgie, vakuové zpracování, vměstky, chemické složení

ABSTRACT

This bachelor thesis describes metallurgical processes of production of steel in electric arc furnaces. It also describes oxidation and reduction phases of melting. Furthermore, it describes the main elements of secondary metallurgy used in steel foundries and their applications. The thesis also concerns with impurities in the steel, namely non-metallic inclusions, gases and trace elements, which is also connected with final utility properties of the steel. This thesis also describes in detail the technological properties of steel. The influence of several selected elements on steel properties is also described. Finally, the thesis evaluates the effect of secondary metallurgy on the volume of defects in steel castings, on mechanical properties and the resulting chemical composition.

Keywords

steel, secondary metallurgy, vacuum processing, inclusions, chemical composition

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NAVRÁTIL, H. *Vliv použití sekundární metalurgie na vlastnosti oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 49. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vliv použití sekundární metalurgie na vlastnosti oceli** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27.5.2016

Datum

Horymír Navrátil

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 VÝROBA OCELI A METALURGICKÉ POCHODY PŘI JEJÍ VÝROBĚ V ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECI	10
1.1 Údobí natavení	10
1.2 Oxidační údobí.....	11
1.2.1 Odfosfoření	13
1.2.2 Oduhličení.....	14
1.3 Redukční údobí	15
1.3.1 Dezoxidace oceli.....	15
1.3.2 Odsíření.....	16
2 SEKUNDÁRNÍ METALURGIE	17
2.1 Pochody probíhající za atmosférického tlaku	17
2.1.1 Rafinace inertními plyny	17
2.1.2 Rafinace syntetickými struskami	18
2.1.3 Pánvová pec – LF	19
2.2 Pochody probíhající za sníženého tlaku (ve vakuu).....	19
3 NEČISTOTY V OCELI.....	24
3.1.1 Nekovové vměstky	24
3.1.2 Další nečistoty v oceli.....	28
4 VLASTNOSTI OCELI.....	29
4.1 Vliv jednotlivých prvků na technologii výroby oceli a její vlastnosti	29
4.1.1 Uhlík	29
4.1.2 Mangan	30
4.1.3 Křemík	30
4.1.4 Vodík	31
4.1.5 Dusík.....	32
4.2 Technologické vlastnosti oceli	33
4.2.1 Tvařitelnost oceli	33
4.2.2 Obrobitelnost oceli.....	35
4.2.3 Svařitelnost oceli.....	35
5 VLIV SEKUNDÁRNÍ METALURGIE NA VLASTNOSTI A ČISTOTU OCELI...36	

5.1	Vliv sekundární metalurgie na koncentraci síry a kyslíku v oceli	36
5.1.1	Příklad výsledků řešení a optimalizace výroby	37
5.1.2	Vliv způsobu odběru vzorku tekuté oceli na obsah kyslíku	38
5.2	Vliv sekundární metalurgie na objem vad a mechanické vlastnosti odlitků.....	39
5.2.1	Vyhodnocení celkové produkce objemu vad u vyrobených odlitků ve ŽDAS a.s. v letech 2001 až 2012, vyjma odlitků s obsahem chromu 9-20%	39
5.2.2	Vliv sekundární metalurgie na mechanické vlastnosti odlitků	40
5.2.3	Vliv sekundární metalurgie na chemické složení oceli	41
ZÁVĚR		44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		45
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		48

ÚVOD

Ať si to uvědomujeme nebo ne, je bez kvalitních ocelových materiálů dnešní svět nemyslitelný. Představa nekvalitních ocelí, plných nečistot, ze kterých jsou postaveny obrovské konstrukce mrakodrapů plných lidí, budí hrůzu. Stejná věc se týká i konstrukcí mostů a dalších konstrukcí. Zde by mohlo mít použití ocelí pochybných kvalit až nedozírné následky. Snad ještě větší nároky na čistotu a kvalitu oceli jsou u odlitků a výkovků pro automobilový průmysl, pro energetiku, zvláště pro tu jadernou. Nejen proto je výzkum, vývoj a snaha o zkvalitňování ocelových materiálů, zároveň i snahou o zkvalitňování světa, ve kterém žijeme. A vlastně i života naší civilizace vůbec. A právě zpracování oceli na zařízeních sekundární metalurgie a další vývoj v této oblasti, je jedním z klíčů k novým možnostem tohoto tradičního materiálu.

Tato práce si klade za cíl popsat základní metody sekundární metalurgie a technologie, které se používají pro výrobu ocelových odlitků a ingotů. Zhodnocen zde bude vliv sekundární metalurgie na chemické složení oceli a její užité vlastnosti.

Výroba oceli vysokých jakostí je v současné době nemyslitelná bez použití sekundární metalurgie. Od jejího použití je možné očekávat razantní snížení koncentrace síry. Pokles koncentrace je také možné předpokládat u kyslíku, vodíku a dusíku, především tedy pokud je ocel vakuována.

V důsledku nižšího obsahu síry a vyšší oxidické čistoty se dá čekat, že to bude mít za následek pozitivní změnu vlastností oceli. A to se zejména týká zlepšení plastických vlastností. Nižší obsah plynů v oceli může vést ke snížení množství vad, které souvisí s výskytem dusíku, vodíku a kyslíku v oceli. A tudíž i snížení zmetkovitosti a nákladů na opravy odlitků.

Sekundární metalurgie se také může dosti výrazně promítnout do ekonomických záležitostí. Zvláště u vysokolegovaných ocelí může její zavedení vést ke snížení nákladů. Což se týká především snížení nákladů na feroslitiny.

1 VÝROBA OCELI A METALURGICKÉ POCHODY PŘI JEJÍ VÝROBĚ V ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECI

Většina oceli vyrobené ve světě, je vyráběna tzv. ocelářským způsobem. Tím se myslí výroba surového železa ze železných rud ve vysoké peci, s následným zpracováním surového železa, kde při snížení obsahu uhlíku a dalších prvků vzniká ocel. V současnosti je k tomu používán především kyslíkový konvertor. Ocel dále často prochází mimopecní rafinací. Pokud se jedná o hutě, jsou tyto provozy doplněny válcovacími traťemi. Jedná se především o výrobu ocelových polotovarů, ocelových profilů, svodidel atd.

Vysoké pece se vyvinuly z tzv. pecí kusových (vlkových). Po delším rozpalování se v nížeji vlkových pecí vytvořil větší kus železa promíšený struskou tzv. vlk. Ten byl dále zpracováván svařováním a kováním, poté co byl předek peci vybourán. Se zlepšením dmychadel a zvýšením pecí na 5 až 6 m, bylo docíleno, že produktem bylo surové železo. Tyto inovace je možné datovat asi do poloviny 17. století [1].

V dnešní době je výkonnost vysokých pecí mnohonásobně vyšší. Vzniklé surové železo je surovinou pro výrobu oceli. Nejčastěji se ke zpracování surového železa používají kyslíkové konvertory. Ty při zpracovávání surového železa především snižují obsah uhlíku, ale i dalších nežádoucích prvků. Probíhá zde jak přímá tak i nepřímá oxidace. Přímá oxidace probíhá v místech malých rychlostí plynného proudu v lázni. Nepřímá, kde vyloučené oxidy (především železa) reagují v objemu lázně s dalšími prvky včetně kyslíku. Pokud jde o jednotlivé prvky, tak železo oxiduje v ohnisku, uhlík převážně na povrchu bublin CO v objemu kovu mimo ohnisko. Na styčné ploše struska – kov, zase dochází k oxidaci křemíku manganu a fosforu [2].

V současné době rostou nároky na kvalitu a čistotu ocelí. V kyslíkovém konvertoru není ve většině případů možné těmto vysokým požadavkům vyhovět. Proto vzniká potřeba po mimopecní rafinaci oceli. Kde je možnost lepšího dolegování a razantnějšího snížení obsahu plynů a dalších nežádoucích prvků.

Mimo většinovou produkci oceli v ocelárnách je část výroby oceli zaměřena na výrobu odlitků, případně ingotů ve slévárnách a menších ingotárnách. Zde slouží jako tavíci agregát především elektrická oblouková pec (EOP) a v menší míře elektrická indukční pec (EIP). V dnešní době je časté, že EOP slouží pouze k natavování a během oxidačního údobí, popřípadě k tavení oceli, na níž jsou kladeny nižší nároky. Redukční údobí, dolegování, snížení obsahu plynů atd. je prováděno zejména za použití některých technologií sekundární metalurgie. Toto je i případ firmy ŽDAS a.s. a tato práce se bude dále zabývat především tímto typem výroby oceli. Dále budou blíže popsány jednotlivé údobí tavby.

1.1 Údobí natavení

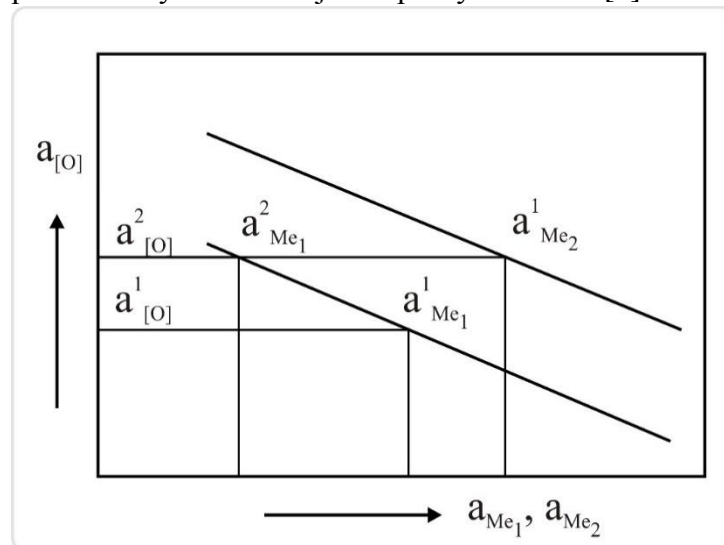
Natavování není nikterak omezeno technologickým postupem, ale pouze výkonem transformátoru a jakostí vsázky. Začíná zapnutím pece (nažhavení elektrického oblouku) po vsazení. Ideální je natavit vsázku s co nejmenší spotřebou elektrické energie a za co nejkratší dobu. Během natavování je spotřebováno 70 až 80% celkové elektrické energie během tavby. Tuto energii je možné snížit dmýcháním plynného kyslíku (exotermické reakce), nebo použitím kyslíko-palivových hořáků. Ty se využívají pouze na počátku natavování. Měří se teplota spalin. Pokud dojde k jejímu zvýšení, tak je ohřev pomocí kyslíko-palivového hořáku ukončen. Protože narůstají ztráty tepla, s tím jak odchází spaliny z pece [3], [4].

Čím vyšší je napětí na elektrodách tím je větší délka oblouku a urychluje se natavování. Také je zapotřebí, aby byly stěny pece během protavování odstíněny vsázkou. Tím pádem je ochráněna vyzdívka pece, jelikož záření elektrických oblouků je absorbováno ve vsázce. Vhodné je také vytvoření napěné strusky, ve které se mohou oblouky skrýt. Aby bylo dosaženo co největšího napětění strusky, je zapotřebí aby poměr CaO/SiO_2 ve strusce byl v rozmezí 1,8 až 2,2. Toho je dosaženo přidáním nahličovadla, rudy a vápna do prázdné pece nebo vsázky [4].

Již během natavování je vhodné částečně odfosfořit a oduhličit. Ovšem není vhodné, aby během natavování došlo k předčasné a nekontrolovatelné oxidaci uhlíku: To by mohlo způsobit problém při odplynění během oxidačního údobí. Navíc zvyšující se obsah uhlíku příznivě ovlivňuje spotřebu elektrické energie a urychluje natavování. Proto je vhodné, aby obsah kyslíku během natavování nebyl příliš vysoký a nevázal na sebe větší množství uhlíku. Kromě oxidace fosforu a uhlíku mohou oxidovat prvky s vysokou afinitou ke kyslíku jako křemík, mangan a chrom. V dnešní době je snaha o maximální zkrácení údobí natavení. Jednou z možností je intenzifikace EOP. Ta se netýká jen údobí natavení, ale všech údobí tavby. Více se zabývá intenzifikací [5], [6]. Údobí natavování končí roztavením veškeré vsázky a odběrem první zkoušky na chemický rozbor [3], [4].

1.2 Oxidační údobí

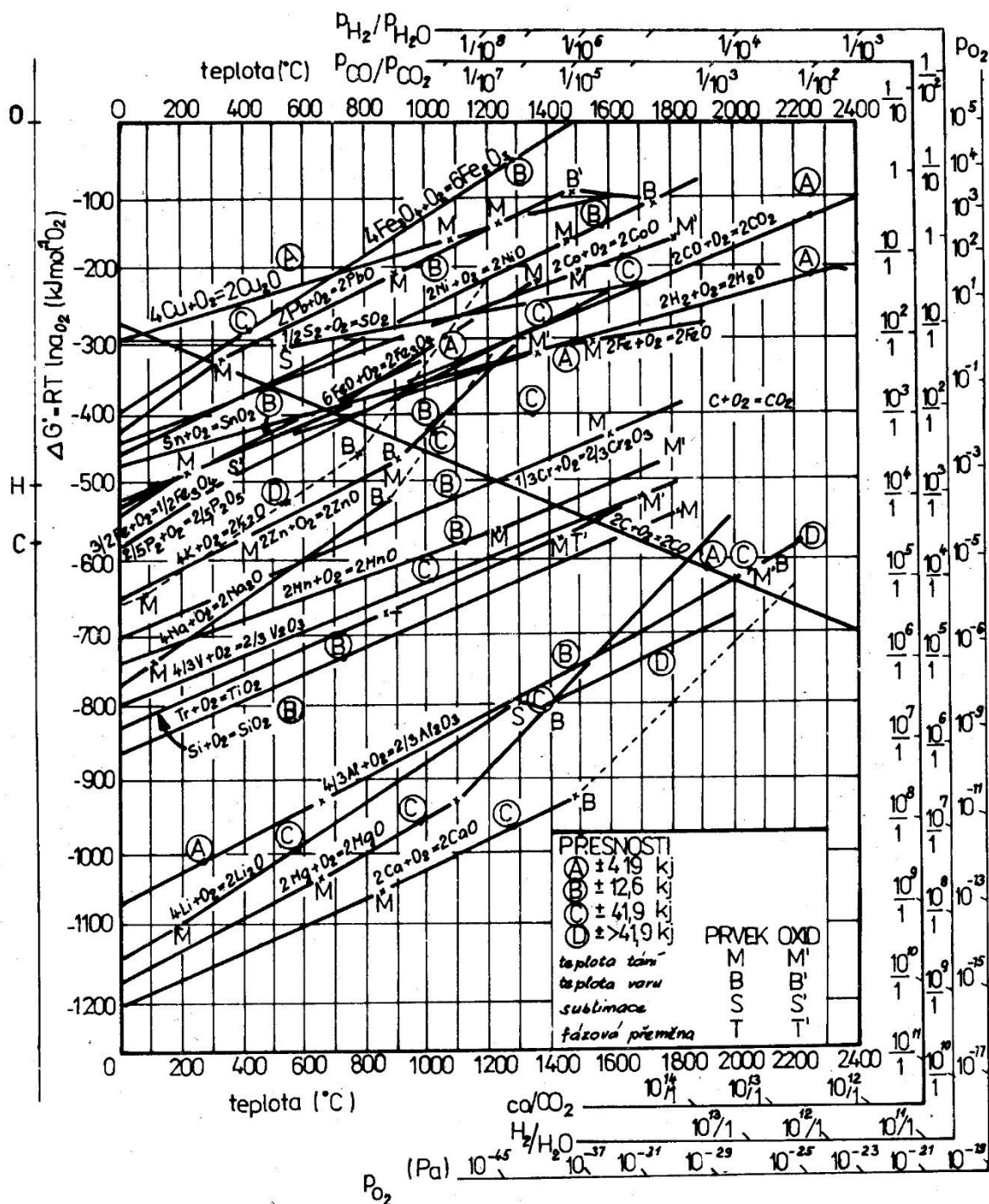
Cílem oxidačního údobí je snížit je obsah nežádoucích prvků v tavenině, jenž mají vyšší afinitu ke kyslíku než železo. Toho je docíleno oxidací těchto nežádoucích prvků, kde tyto nežádoucí prvky přecházejí z lázně do strusky anebo do pecní atmosféry. Z čehož plyne, že k tomu aby bylo možné tyto nežádoucí prvky oxidovat, je zapotřebí dostat kyslík do reakční zóny. K tomu je možné použít železnou rudu a plynný kyslík. Jednotlivé prvky oxidují podle afinity ke kyslíku a aktivity v lázni. Jak je znázorněno na **obr. 1**. Jak je vidět, na počátku oxidace se v tavenině nacházejí dva prvky Me_1 a Me_2 s aktivitami $a_{\text{Me}_1}^1$ a $a_{\text{Me}_2}^1$. První z prvků je při aktivitě $a_{\text{Me}_1}^1$ v rovnováze s nižší aktivitou kyslíku než druhý. Při nijak neomezovaném přívodu kyslíku do taveniny dojde přednostně k oxidaci prvního prvku. Jeho aktivita postupně klesne na hodnotu $a_{\text{Me}_1}^2$. Současně aktivita kyslíku vzroste z hodnoty $a_{[\text{O}]}^1$ na hodnotu $a_{[\text{O}]}^2$. Při aktivitě kyslíku $a_{[\text{O}]}^2$ je kyslík v rovnováze jak s aktivitou prvního prvku $a_{\text{Me}_1}^2$, tak i zároveň s aktivitou druhého prvku $a_{\text{Me}_2}^1$. S dalším přívodem kyslíku oxidují oba prvky současně [4].



Obr. 1. Znázornění oxidace prvků s různou aktivitou ke kyslíku [4]

Grafické znázornění afinity jednotlivých prvků ke kyslíku v závislosti na teplotě poskytuje Ellinghamův diagram na **obr. 2**. Jsou na něm znázorněny teplotní závislosti příslušných změn Gibbsovy energie pro reakce vzniku oxidů odpovídajících prvků. Termodynamické zákonitosti, které plynou z tohoto diagramu, jsou vodítkem pro řešení některých metalurgických otázek. Především se jedná o problematiku stálosti oxidů. Čím je zápornější hodnota změny

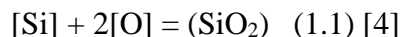
Gibbsovy energie, vyjadřující vznik oxidu, tím je oxid stálější. Každý z prvků s vyšší afinitou ke kyslíku je schopen redukovat oxidy prvků, které mají nižší afinitu ke kyslíku. Zpravidla jako první během oxidace v EOP oxiduje křemík, následně v závislosti na jejich aktivitě v lázni mangan, fosfor a uhlík [3], [7].



Obr. 2. Ellinghamův diagram pro oxidy kovů [8]

Oxidační údobí probíhá mezi odběrem prvního vzorku pro chemický rozbor a stažením oxidační strusky, po jejímž stažení dojde k nahození dezoxidačních přísad. Často však probíhá oxidace již během tavení. Pokud se do vsázky přidá ruda a vápno. Jedná se zejména o oxidaci křemíku, manganu, fosforu a uhlíku. Nejprve je zapotřebí snížit obsah křemíku.

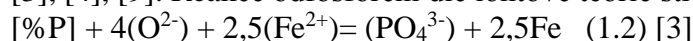
Toho je zapotřebí, aby se zvýšila aktivita kyslíku. Vyšší aktivita kyslíku je nutná k důslednému odfosfoření a oduhličení taveniny [4]. Pro popsání reakce kyslíku s křemíkem v soustavě Fe-O-Si je možné použít rovnici (1.1).



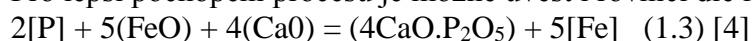
Oxidace křemíku probíhá částečně již během natavování a především na začátku oxidačního údobí, kdy je oxidace velmi intenzivní po přidání první dávky rudy. Jedná se o silně o exotermickou reakci, proto také probíhá za nižších teplot lázně. Při stejném obsahu kyslíku, bude obsah křemíku za nižších teplot nižší. Tudíž oxidace křemíku bude intenzivnější. Na konci oxidačního údobí je obsah křemíku cca 0,01%. To platí za normálních teplot. Za zvýšených teplot může být jeho obsah 0,02 až 0,03%. Velmi nízký obsah křemíku je způsoben tím, že vzniklý komplexní aniont je v zásadité strusce silně vázán [3].

1.2.1 Odfosfoření

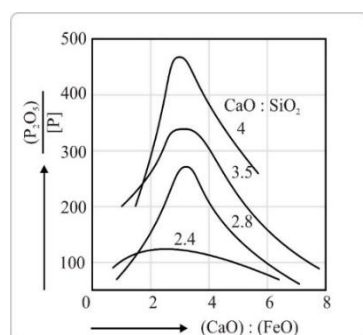
Fosfor zvyšuje náchylnost oceli k popouštění křehkosti. Škodlivý je fosfor především u těžkých odlitků a vysokopevnostních ocelí. Při dostatečném snížení obsahu křemíku a za nízké teploty probíhá oxidace fosforu. Jedná se o exotermickou reakci. Dle Le Chatelier-Braunova principu u exotermických reakcí roste s klesající teplotou hodnota rovnovážné konstanty. Aby tato reakce mohla začít, je nutné pro ni vytvořit vhodné podmínky. Je zapotřebí, aby ve strusce byla vysoká koncentrace aniontů kyslíku a kationtů železa. Naopak koncentrace komplexního aniontu (PO_4^{3-}) ve strusce by měla být nízká. Je také možné vytvořit novou strusku s nízkým obsahem (PO_4^{3-}), za předpokladu, že ve stávající strusce je vysoký obsah fosforu. Stupeň odfosfoření se prudce zvýší za přítomnosti kationtu Ca^{2+} . Pokud má dojít k hlubokému odfosfoření je zapotřebí, aby byl ve strusce určitý obsah CaO , FeO a kyselých oxidů. Odfosfoření bude tím intenzivnější, čím větší bude poměr $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ [3], [4], [9]. Reakce odfosfoření dle iontové teorie strusek probíhá podle rovnice (1.2).



Pro lepší pochopení procesu je možné uvést i rovnici dle molekulové teorie strusek (1.3).



Dle molekulové teorie strusek probíhá odfosfoření na mezifázovém rozhraní struska – kov. Kde fosfor rozpuštěný v lázni reaguje s oxidem vápenatým a železnatým obsaženým ve strusce [4].



Obr. 3. Stupeň odfosfoření [4]

Efektivita odfosfoření je dána tzv. stupněm odfosfoření (L_P). Ten vyjadřuje poměr aktivity fosforu ve strusce k aktivitě fosforu v lázni [4]. Je dán vztahem (1.4)

$$L_P = \frac{a_{(\text{P})}}{a_{[\text{P}]}} = \frac{(P)}{[P]} \quad (1.4) \quad [4]$$

kde - $a_{(\text{P})}$...aktivita fosforu rozpuštěného ve strusce

$a_{[\text{P}]}$...aktivita fosforu rozpuštěného v lázni

Aby bylo dosaženo co nejvyššího stupně odfosfoření, měl by být poměr $(\text{CaO}) : (\text{FeO})$ ve strusce okolo 3. Stupeň odfosfoření dále roste s rostoucím poměrem $\text{CaO} : \text{SiO}_2$. A to až do poměru 4. Jak je vidět na **obr 3**.

1.2.2 Oduhličení

Uhlík se dostává z oceli ve formě bublinek oxidu uhelnatého. Oduhličovací reakce probíhá při vyšší teplotě a po přihození rudy, nebo dmýchání kyslíku [3], [4].

Uhlíkový var (oduhličovací reakce) -

- a) Rozpouštění rudy ve strusce je endotermickou reakcí. Přičemž i ohřev rudy na teplotu lázně spotřebovává teplo [4]. Reakce rozpouštění rudy je popsána rovnicí (1.5)
$$(\text{Fe}_2\text{O}_3) + [\text{Fe}] = 3(\text{FeO}) \quad (1.5) \quad [4]$$
- b) Přejednost kyslíku ze strusky do oceli, kyslík difunduje do reakční zóny, dle rovnice (1.6).
$$(\text{FeO}) = [\text{Fe}] + [\text{O}] \quad (1.6) \quad [4]$$
- c) Na mezifázovém rozhraní struska - kov, probíhá oxidace uhlíku. Rychlost této reakce závisí na difuzi kyslíku a uhlíku do reakční zóny, vliv má i teplota lázně a strusky [4]. Tato reakce je vyjádřena rovnicí (1.7)
$$[\text{C}] + [\text{O}] = \{\text{CO}\} \quad (1.7) \quad [4]$$
- d) Vznikají zárodky bublin oxidu uhelnatého, přičemž reakce probíhá pod mezifázovým rozhraním struska – kov. Parciální tlak oxidu uhelnatého roste s hloubkou lázně. V povrchové vrstvě lázně pod hladinou strusky může začít var [4].
$$[\text{CO}] = \{\text{CO}\} \quad (1.8) \quad [4]$$
- e) Vzniklé bubliny oxidu uhelnatého promíchávají strusku, v níž je vysoká aktivita CO. Částečně dochází i k promíchávání taveniny. Atomy kyslíku a uhlíku se přesouvají do reakční zóny a difundují na povrch bublin [3], [4].
- f) Růst bublin a jejich vyplouvání ven z taveniny – uhlíkový var [4].

Uhlíkový var probíhá, pokud je vysoký obsah oxidu železnatého ve strusce a uhlíku v lázni. Další podmínkou je velké povrchové napětí, které způsobuje špatná smáčivost mezi lázní a struskou. Aktivita uhlíku určuje aktivitu kyslíku, poté co dozní intenzivní var [3].

Výhody uhlíkového varu

- a) Odplynění oceli - Při uhlíkovém varu do vznikajících bublin oxidu uhelnatého difunduje vodík a dusík. Což vede při dostatečné oduhličovací rychlosti ke snížení obsahu vodíku a dusíku v roztaveném kovu. Ovšem při příliš velké oduhličovací rychlosti se budou tvořit menší bubliny a odplynění bude horší. Dusík i vodík opouští lázeň přechodem do plynné fáze, v tomto případě představují plynnou fázi bubliny oxidu uhelnatého. Vodík se do lázně dostává především z vápna, ale při dobře vedeném uhlíkovém varu lze jeho obsah poměrně dost snížit. Větší problém je se snížením obsahu dusíku, protože dusík má horší difuzivitu a proto se obtížněji pohybuje v roztaveném kovu [3], [4].
- b) Tepelná a chemická homogenizace taveniny - Stoupající bubliny oxidu uhelnatého intenzivně promíchávají lázeň, přičemž se vyrovnává chemické složení a teplota v jednotlivých částech lázně. Rozdíly teplot v tavenině jsou důsledkem nerovnoměrného ohřevu pod elektrodami. Homogenizace taveniny je také důvodem, proč jsou odběry vzorků pro analýzu chemického složení během uhlíkového varu nejbližší skutečnému chemickému složení v celé lázni [3], [4].

1.3 Redukční údobí

Začíná po stažení oxidační strusky a následném přidání dezoxidačních přísad. Cílem je dezoxidace oceli, odsíření, dolegování a konečná úprava teploty. Je také nutné udržet požadovanou koncentraci dusíku a vodíku v lázni [3], [4].

1.3.1 Dezoxidace oceli

Jejím cílem je snížit obsah kyslíku v lázni. Dezoxidaci oceli je možné provést více způsoby.

- a) Srážecí dezoxidace - Provádí se přidáváním prvků, jenž mají vysokou afinitu ke kyslíku. Přičemž část oxidů vyplouvá do strusky a část zůstává obsažená v oceli jako vměstky. Mezi prvky jenž je možné použít ke srážecí dezoxidaci, je možné zařadit mangan, křemík, hliník, vápník, titan. Přitom každý z nich má různou dezoxidační schopnost. Mangan a křemík mají nižší dezoxidační schopnost, proto se primárně k dezoxidaci oceli na odlitky nepoužívají. Naopak hliník patří mezi silná dezoxidovadla. Pokud je jeho koncentrace větší než 0,030% je zamezen vznik bublin (bodlin) v oceli. Důvodem je, že hliník na sebe při odlévání, chladnutí i tuhnutí váže kyslík (sekundární oxidace), a ten nereaguje s uhlíkem, proto neprobíhá uhlíková reakce. Velmi důležité je, jak je obsah hliníku v oceli měřen. Hliník totiž existuje v oceli jako oxid, nitrid a také jako prvek rozpuštěný v roztoku (oceli). Rozdíl mezi hliníkem rozpuštěným v oceli a hliníkem tvořícím oxidy určuje tzv. oxidickou čistotu. Problémem, který může nastat při vyšším obsahu hliníku u masivních odlitků je vznik lasturových lomů. Omezit jejich vznik je možné snížením obsahu dusíku a také zjemněním austenitického zrna. Obsah hliníku se musí pohybovat v úzkém rozmezí. Měl by být dostatečně vysoký, aby bylo zabráněno vzniku bodlin. Ale jeho obsah nesmí být příliš vysoký kvůli nebezpečí vzniku lasturových lomů. Společně s hliníkem se k dezoxidaci používá titan. Přičemž titan na sebe váže dusík a hliník na sebe váže kyslík [3], [4].

Silnější dezoxidační účinek než hliník má vápník. Vápník má však malou rozpustnost v oceli a nízkou teplotu varu. K jeho zplyňování dochází při normálním tlaku asi při 1498 °C. Křemík, hliník a nikl zvyšují rozpustnost vápníku v oceli. Zároveň u vápníku také snižují teplotu varu. Vápník se používá převážně po dezoxidaci hliníkem a hlavním účelem jeho použití je modifikace vměstků [3], [4].

- b) Extrakční (difúzní) dezoxidace – Rozdělovací koeficient kyslíku mezi roztavenou struskou a roztaveným železem s libovolným chemickým složením je možné vyjádřit pomocí rovnice (1.8) [7].

$$K_O = \frac{[\% O]}{a_{(FeO)}} \quad (1.8) [7]$$

kde - [% O]...obsah kyslíku v roztaveném železe pod struskou uvažovaného složení
 $a_{(FeO)}$ aktivita oxidu železnatého ve strusce uvažovaného složení

V praxi za běžných podmínek není rovnovážného rozdělení kyslíku mezi struskou a kovem běžně dosahováno, protože platí (1.9) [7].

$$[\% O] < K_O \cdot a_{(FeO)} \quad (1.9) [7]$$

Podstatou extrakční dezoxidace roztavené oceli je, že při snižování $a_{(FeO)}$ ve strusce jsou vytvářeny vhodné podmínky, aby platilo (1.10) [7].

$$[\% O] > K_O \cdot a_{(FeO)} \quad (1.10) [7]$$

Pouze za těchto podmínek kyslík difunduje z roztaveného kovu do strusky. Tato difúze probíhá za dané teploty až do rovnovážného rozdělení kyslíku mezi obě fáze. [7]

Rovnovážná aktivita kyslíku závisí při určité teplotě, v čistém železe, pouze na aktivitě oxidu železnatého ve strusce. Jeho aktivitu lze snížit přidáním koksu nebo ferosilicia. Vměstky se v lázni netvoří, protože produkty dezoxidace zůstávají obsažené ve strusce [4].

Nevýhodou extrakční dezoxidace je její pomalý průběh a také zde hrozí riziko zvýšení obsahu plynů v oceli [10].

- c) Dezoxidace za podtlaku (ve vakuu) – Při vyšších teplotách a ve vakuu je uhlík obsažený v tavenině účinným dezoxidovadlem. Je proto schopný redukovat i velice stabilní oxidy a díky tomu je možné vyrábět oceli s vysokou oxidickou čistotou. Reakcí kyslíku a uhlíku je oxid uhelnatý. Ten je v oceli téměř nerozpustný a dostává se z lázně v plynné fázi jako bublina. Nedochozí k tvorbě oxidických vměstků a i obsah plynů je touto technologií snížen. Odvod plynů z lázně je realizován skrze bubliny oxidu uhelnatého, jako tomu je u uhlíkového varu během oxidačního údobí. V praxi je tato technologie využívána v pochodu VD [4].

1.3.2 Odsíření

Síra v oceli je považována zpravidla za nežádoucí prvek, nicméně v určitém množství a za určitých podmínek může zlepšit obrobitelnost. Při tuhnutí síra segreguje do mezidendritických prostor. Pokud je překročena její rozpustnost v železe, dochází ke vzniku sulfidů. Sulfidy jsou nevhodné především proto, že se při tváření deformují. Zvláště sulfidy železa obsažené v oceli snižují velmi výrazně její pevnost a tažnost od teploty likvidu až pod 1200 °C. K zabránění vzniku sulfidů železa se přidává do oceli mangan. Mangan má totiž větší vyšší afinitu k síře než železo, proto se síra přednostně váže na mangan [3], [4].

Reakce odsíření probíhá na mezifázovém rozhraní struska-kov [4] (dle molekulové teorie strusek) dle rovnice (1.9).



Účinnost odsíření se zvýší snížením aktivity kyslíku v lázni a obsahu oxidu železnatého ve strusce. Pro dobré odsíření je zapotřebí hluboká dezoxidace. Dále selepší podmínky pro odsíření zvýšením zásaditosti strusky, dmýcháním prachového vápna a redukčních přísad (silokalcium, hořčík), které vedou ke snížení obsahu oxidu železnatého v místě reakce. Zrychlení odsíření je dosaženo převedením síry na sulfid, ten je totiž v ocelové lázni nerozpustný, proto je vyloučen a dojde k jeho vyplavování do strusky. Během tavení je vznik sulfidu v tomto případě žádoucí, na rozdíl od vzniku sulfidu při tuhnutí. Pohyb atomu síry během odsíření probíhá nejprve tak, že síra difunduje k rozhraní lázeň-struska. Poté dojde k jejímu přechodu z lázně do strusky. Následně probíhá difúze ve strusce od styčné plochy lázeň-struska. Efektivita odsíření je dána tzv. stupněm odsíření (L_S). Ten vyjadřuje poměr aktivity síry ve strusce k aktivitě síry v lázni. [3], [4]. A je dán vztahem (1.8).

$$L_S = \frac{a_{(\text{S})}}{a_{[\text{S}]}} = \frac{(\text{S})}{[\text{S}]} \quad (1.10) [4]$$

kde - $a_{(\text{S})}$...aktivita S rozpuštěného ve strusce

$a_{[\text{S}]}$...aktivita S rozpuštěného v lázni

2 SEKUNDÁRNÍ METALURGIE

Využití sekundární metalurgie má své uplatnění především ve zvyšování kvality vyráběné oceli. Dále se však nesmí zapomenout, že její zavedení může vést za určitých podmínek ke snížení nákladů na tavení oceli. Jak rostou požadavky na kvalitu vyráběných ocelí, není se v současné době možné obejít bez postupů sekundární metalurgie a zvláště pak u ocelí s vysokou oxidickou čistotou. Pochody sekundární metalurgie je možné rozdělit na pochody probíhající za atmosférického a sníženého tlaku [4]. Příklad jak funguje výroba oceli s použitím prvky sekundární metalurgie v reálném průmyslovém prostředí, je možné nalézt v [11].

2.1 Pochody probíhající za atmosférického tlaku

Při atmosférickém tlaku probíhají pochody sekundární metalurgie buď v pánvi anebo konvertoru. Někdy bývají tyto pochody dále členěny, podle toho zda umožňují, nebo neumožňují ohřev upravovaného kovu. Mezi pochody, jenž toto umožňují patří pánvová pec, o které bude dále v práci zmínka a konvertorové pochody AOD a CLU. Příklady jednotlivých postupů budou dále uvedeny [4].

2.1.1 Rafinace inertními plyny

Principem této metody je dmýchání inertního plynu do roztavené oceli. Jako inertní plyn se využívá nejčastěji argon. Může se však jednat i o dusík a oxid uhličitý. Pozitivní vliv má použití inertního plynu při snížení obsahu plynů v oceli. Konkrétně se jedná o vodík a dusík. Přičemž v praxi má smysl u této technologie uvažovat pouze o snížení obsahu vodíku. Množství odstraněného vodíku je závislé především na množství dmýchaného argonu. Pro určení jeho množství je důležitá hloubka lázně a velikost bublin s čímž souvisí i rychlost jejich vyplouvání. V bublinách argonu, které probublávají lázeň, je nulový parciální tlak vodíku a dusíku. Principem odplynění je difuze atomu vodíku, případně dusíku do bubliny argonu. Tam asociuje na molekuly a stejně jako u uhlíkového varu, opouští lázeň společně s bublinami argonu. Děje se tak, protože vodík a dusík obsažený v lázni se snaží dosáhnout rovnovážného stavu s vodíkem a dusíkem obsaženým v plynné atmosféře. Zde plynnou atmosféru představuje bublina argonu. Tento děj probíhá až do dosažení rovnovážného stavu, při jehož dosažení je parciální tlak v plynné atmosféře roven koncentraci vodíku a dusíku v lázni. Předpokladem k odplynění touto cestou je, aby bublina argonu zůstala dostatečně dlouhou dobu v lázni, než bude dosaženo rovnovážného stavu. Pro dosažení nízkých hodnot obsahu vodíku je samotné dmýchání argonu málo efektivní. K dosažení nízkých koncentrací vodíku je nutné použít současně vakuování. Účinnost použití argonu na odplynění navíc klesá, pokud je v lázni přítomen kyslík či jiné povrchově aktivní látky. Při nízkých koncentracích vodíku je k odstraňování 1 ppm vodíku zapotřebí větší množství argonu, než by bylo, pokud by obsah vodíku před dmýcháním argonu byl vyšší. Pokud při dmýchání inertního plynu probíhá současně i uhlíková reakce, zvyšuje se účinnost odplynění. Pro stejný efekt odplynění je možné použít méně argonu [4], [12].

Množství odstraněného plynu je závislé na chemickém složení oceli, na teplotě, na množství dmýchaného inertního plynu a na kinetických faktorech [12].

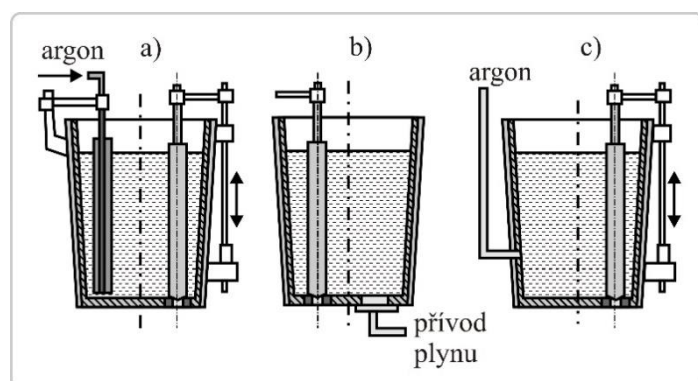
Probublávání taveniny argonem podporuje flotaci vměstků, přičemž se nekovové vměstky vážou na bubliny argonu a jsou vynášeny z taveniny. Aby vměstek přilnul k bublině argonu, jsou podstatné povrchové energie na mezifázových rozhraních vměstek-kov W_{v-1} , vměstek-plyn W_{v-g} a kov-plyn W_{1-g} . Mělo by dojít ke snížení povrchové energie na mezifázovém

rozhraní vměstek-plyn oproti mezifázovým rozhraním vměstek-kov, kov-plyn [4], [12]. To vyjadřuje rovnice (2.1)

$$W_{v-g} < W_{v-1} + W_{1-g} \quad (2.1) \quad [12]$$

Vyplování vměstků zlepšuje oxidickou čistotu oceli a přináší i zlepšení její zabíhavosti [4].

Při nízké intenzitě dmýchání argonu závisí počáteční velikost bubliny na povrchu tvárnice. Při vyšší intenzitě dmýchání je pak velikost bublin závislá pouze na intenzitě dmýchání. To je důležité z hlediska toho, že velikost bublin při vyplování a prakticky i rychlost při vyplování na povrch lázně, je výrazně ovlivněna velikostí bubliny při průchodu tvárnici. Bubliny s menším poloměrem se pohybují laminárně a ty větší naopak turbulentně. Pro dmýchání argonu do oceli se používají porézní žáruvzdorné materiály. Tyto materiály by měli mít vysokou poréznost, pevnost a odolnost proti mechanickému působení roztaveného kovu, teplotní stálost při teplotách 1550-1650 °C, chemickou odolnost vůči roztavenému kovu a strusce. Konkrétně se jedná o materiály jako korund, spinel, korundový mulit, zirkonsilikát a magnezit. Pro dobrou průchodnost se požaduje pórovitost 25-40%. Pórovitost je ovlivněna chemickým složením materiálu, jeho strukturou a způsobem jeho zpracování. Inertní plyn se může dmýchat přes pomocnou zátkovou (falešnou) tyč, přes pórovitou oplášťovanou tvárnici umístěnou ve dně pánve (technologie Gazal), anebo přes prodyšnou tvárnici umístěnou ve stěně pánve. Schématické znázornění způsobů dmýchání inertního plynu do pánve je na **obr. 4**. V praxi se nejvíce využívá technologie Gazal, přičemž lepších výsledků lze dosáhnout za použití vakua. Kdy je pánve umístěna ve vakuovém kesonu [4], [12].



Obr. 4. Způsoby dmýchání inertního plynu do pánve [4]

Mezi další výhody dmýchání inertního plynu je možné zařadit urychlené rozpouštění feroslitin, rozpouštění a promíchávání syntetické strusky, tepelnou a chemickou homogenizaci. Dále se využívá dmýchání argonu k řízenému ochlazování a to zejména u vysokolegovaných ocelí, jenž mohou být přehřátý z tavicího agregátu. Především však pomáhá dmýchání inertního plynu snižovat množství vad, zapříčiněných proměnlivou teplotou oceli při lití.

Konkrétně se jedná o omezení výskytu zavalenin, zapečenin a studených spojů. V neposlední řadě je také možné snížit lící teplotu, v důsledku lepší zabíhavosti tekutého kovu [4].

2.1.2 Rafinace syntetickými struskami

Podstata tohoto rafinačního pochodu je založena na zrychlení reakcí mezi struskou a taveninou. Ty se během odlévání vzájemně prostupují, je možné o hovořit o tzv. prolévání. Jedná se o metodu, která funguje na vzájemné reakci tekutého kovu a strusky. Rafinaci oceli touto metodou je zajištěna díky vhodným kinetickým a termodynamickým podmínkám. Pokud jsou splněny, mohou probíhat požadované reakce v soustavě kov-struska. Především je zapotřebí zrychlení difúze. Toho je dosaženo zvětšením stykové plochy mezi struskou a kovem, zmenšením tloušťky difúzní vrstvy a také snížením viskozity té fáze, kde je difúze limitujícím faktorem pro průběh reakce. Pokud je zvoleno vhodné chemické složení

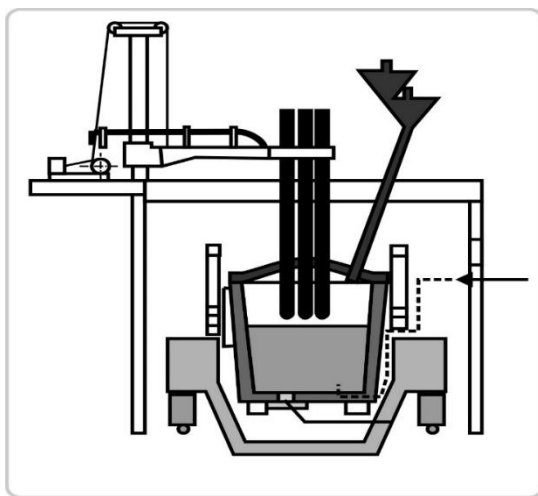
syntetické strusky, klesá její viskozita a roste velikost rozdělovacího koeficientu složky mezi struskou a kovem. Při odlévání taveniny do pánve se syntetickou struskou, dojde ke vzájemnému prostoupení obou fází. Zároveň se i zvětšuje styková plocha obou fází, které se přitom vzájemně promíchávají. Díky tomu dochází k urychlení rafinace a vyplouvání nekovových vměstků [4], [13].

Hlavní složkou syntetických strusek je oxid vápenatý. Ten však má vysokou teplotu tavení. Proto se do syntetických strusek přidává tavidlo. Největší využití má syntetická struska při odsíření oceli v pánvi. Odsíření touto metodou se provádí u již dezoxidovaných ocelí. Samotný postup použití syntetických strusek spočívá v jejich vhození do pánve ještě před odpichem. Během odpichu se již do pánve začíná dmýchat argon. Většinou po ukončení odlévání oceli do pánve je již struska plně roztavena. Rafinační pochody již probíhají mimo pec, která je volná k nasazení. V současnosti se syntetické strusky dmýchají do pánve některým ze způsobů injektáže. Může se jednat např. o pochody IP a TN [4], [13].

2.1.3 Pánvová pec – LF

Jedná se o zařízení podobné EOP, které slouží k dezoxidaci a odsíření oceli. Umožňuje přehřev kovu, proto může být použita v tandemu s pochodem VD. Příkladem, může být ohřev tekutého kovu na požadovanou odpichovou teplotu po vakuovém zpracování, kde došlo k ochlazení taveniny.

Její zavedení mění organizaci práce v tavírně a její zavedení je výhodné pouze při plně vytížené tavírně s poměrně rovnoměrným odběrem kovu. Jinak by její zavedení vedlo pouze ke zvýšení nákladů na provoz tavírny [4].



Obr. 5. Pánvová pec [4]

Zpravidla přes porézní tvárnici je do taveniny dmýchán inertní plyn (argon, dusík). V pánvové peci je prováděna redukční fáze tavby, včetně odsíření, pokud není prováděno dále na některé z technologií vakuové metalurgie. Je zde provedena částečná dezoxidace kovu a dochází k vytvoření nové silně zásadité (rafinační) strusky. Velkou výhodou pánvové pece je možnost velmi přesného dolegování. Je možné snížit rozpětí obsahu jednotlivých prvků. V případě, kdy je legováno na spodní hranici obsahu prvku dané normou, jsou sníženy náklady na tavbu. To je patrné hlavně u drahých feroslitin a dalších legujících přísad. Mezi další výhody pánvové pece patří vylepšení podmínek

pro flotaci vměstků, což má za následek zlepšení tekutosti oceli. Obojí je možné díky dmýchání inertního plynu. Schéma pánvové pece je znázorněno na **obr. 5** [4].

2.2 Pochody probíhající za sníženého tlaku (ve vakuu)

Pomocí mimopecního zpracování oceli ve vakuu dochází k výraznému snížení obsahu vodíku, dusíku a kyslíku. Taktéž je snížen propal legujících a dezoxidačních prvků. V neposlední řadě dochází k úbytku nekovových vměstků. A zároveň je příznivě ovlivněno jejich uspořádání. Ve vakuu je možné zkrátit dobu celkovou dobu tavby a zajistit větší homogenitu mechanických vlastností. Navíc je možné ocel hluboce odsířit [4], [12].

Jedná se o procesy probíhající za sníženého tlaku. Kde prudce roste afinita uhlíku ke kyslíku. Uhlík se proto stává velice silným dezoxidačním prvkem, proto je možné dosáhnout velice nízké aktivity kyslíku. Díky tomu, je možné redukovat i velice stabilní oxidy, které by za normálního tlaku nešlo za běžných ocelářských podmínek vůbec redukovat. Podle termodynamických zákonitostí závisí dezoxidační schopnost uhlíku na parciálním tlaku oxidu uhelnatého v plynné fázi nad kovem. Dá se říci, že čím nižší bude tlak, tím menší množství kyslíku bude v rovnovážném stavu s uhlíkem při jeho dané koncentraci. V praxi se však ukazuje, že při jistém tlaku oxidu uhelnatého, již nezávisí dezoxidační schopnost uhlíku na tlaku oxidu uhelnatého nad taveninou. Nýbrž zůstává konstantní. Nesoulad hodnot experimentálně zjištěných a dle termodynamických zákonů vypočítaných je přisuzován tomu, že dezoxidační schopnost uhlíku ve větší hloubce lázně není primárně dána tlakem oxidu uhelnatého nad hladinou lázně. Ta určuje pouze dezoxidační schopnost uhlíku v povrchových vrstvách oceli. Ve větší hloubce lázně je dezoxidační schopnost uhlíku dána tlakem oxidu uhelnatého ve vznikajících bublinách. Přičemž tlak v bublinách je výrazně vyšší než nad povrchem lázně. Tento poznatek je zapotřebí vzít do úvahy pro přesnější výpočty při použití uhlíku k dezoxidaci. Proto je také pro dezoxidaci uhlíkem, tak důležitá tvorba bublin oxidu uhelnatého v lázni. Ta je závislá na celkovém tlaku p_{co} . Ten je roven součtu atmosférického tlaku na kovem, ferostatického tlaku tekutého kovu nad místem vzniku bubliny a tlaku pro překonání kapilárních sil během tvoření povrchu rozhraní kov-plyn [4], [12] [14].

Dezoxidační schopnost uhlíku roste s množstvím bublin a také je podmíněna velikostí parciálního tlaku oxidu uhelnatého v bublinách. Přičemž k nukleaci bublin oxidu uhelnatého může docházet jak v pórech vyzdívky pánve i na povrchu nekovových vměstků. Po vzniku dostatečného množství bublin, které při pohybu v tavenině rostou a následně jsou odlučovány z oceli, dochází k promíchávání lázně a vyplouvání nekovových vměstků z oceli. Prakticky probíhá var lázně v důsledku uhlíkové reakce. Oxid uhelnatý se může do plynné fáze vylučovat i přímo nad hladinou lázně. V průběhu uhlíkové reakce dochází i k vylučování CO_2 do plynné fáze nad hladinou kovu. Ale z celkových oxidů uhlíku se jedná jen asi o 1 až 2%. Proto se v praxi zanedbává [12].

Na druhé straně je možné dosáhnout velmi nízkých obsahů uhlíku. Toho se využívá například při výrobě vysokolegovaných chromových ocelí. U nichž je dosaženo velmi nízkých obsahů uhlíku při minimálním propalu chromu. Protože při použití vakuování probíhá přednostně oxidace uhlíku, před oxidací chromu. Oxidace chromu bude tím menší, čím bude při dané teplotě nižší parciální tlak oxidu uhelnatého [4].

Odplynění taveniny probíhá difúzí plynů (vodík, dusík) do bublin oxidu uhelnatého, nebo bublin argonu promíchávajících lázeň. Protože samostatné zárodky bublin vodíku a dusíku v praxi nevznikají. Případně odplynění probíhá difúzí plynů pryč z roztaveného kovu, s jejich následným přechodem do atmosféry. Výsledné odplynění je lepší při intenzivním varu, či při dmýchání inertního plynu. A to z důvodu fiktivního zvětšení povrchu lázně, jelikož část z celkového obsahu vodíku a dusíku odejde ve formě plynu v bublině ještě pod hladinou lázně. Na odplynění mají vliv i rozměry pánve [12].

V tavenině rozpuštěné prvky se z ní mohou při sníženém tlaku také vypařovat. To je žádoucí u škodlivých prvků v oceli. Jedná se zejména o síru, fosfor, arsen, antimon a olovo. Ovšem na druhou stranu může docházet k nežádoucímu snížení obsahu legujících prvků. Je však nutné zmínit, že v praxi mimopecní vakuové metalurgie oceli nemá vypařování prvků z taveniny velký význam. Obvykle totiž doba vakuování nepřesahuje 15 minut [12].

Zavedení vakuové metalurgie do výroby má i své finanční aspekty. Ne vždy se průmyslovým podnikům vyplatí. Její zařazení u technologie výroby oceli na odlitky je závislé jednak na sortimentu výrobků, ale především na požadovaných materiálových a užitných vlastnostech vyráběných odlitků. Pro potřeby sléváren je možné doporučit postupy VD, VOD a DETEM (speciálně upravené zařízení VD/VOD pro velmi malé hmotnosti taveb). Ostatní prvky sekundární metalurgie pracující při tlaku na úrovni vakua jsou vhodné především pro velké hutě. Jedná se například o postupy RH a DH. I tady jsou aplikace jednotlivých zařízení pečlivě zvažovány s ohledem na očekávaný budoucí sortiment výrobků [15].

Předtím než budou zavedeny prvky vakuového zpracování oceli do výroby, je velmi důležitá znalost neúplných vlastních nákladů. Pro slévárny, kde se budou vakuově zpracovávat menší objemy tekutého (do 10 tun), je možné doporučit vakuové zařízení DETEM. Při vyšších hmotnostech pak VD, případně VOD. [15].

Jednotlivé postupy vakuové metalurgie je možné kombinovat s dalšími prvky sekundární metalurgie v integrovaném systému sekundární metalurgie [16]. Více o vakuové metalurgii a vakuové technice je možné najít v [17], [18].

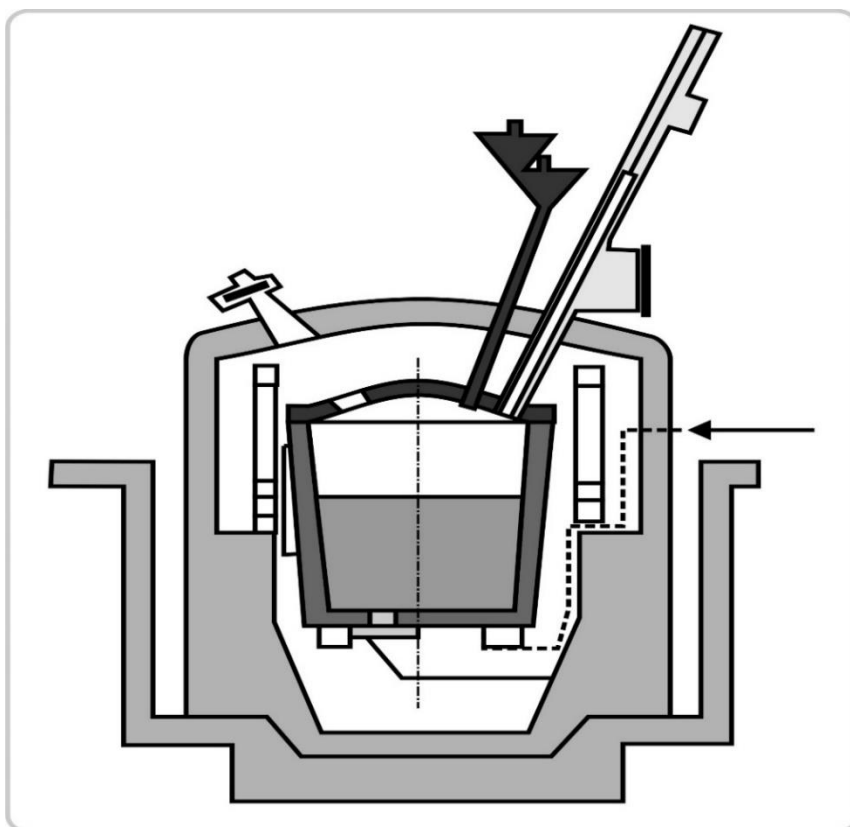
a. Pochod VD :

Jedná se o jeden z nejstarších pochodů vakuové metalurgie. Při němž se roztavená ocel v pánvi zaváží do vakuového prostoru (keson). Následně je pánve uzavřena hermeticky utěsněným víkem a dochází ke snížení tlaku pod víkem v kesonu. Vakuum je vytvářeno pomocí para proudových vývěv. Při vakuování se udržuje tavenina při tlaku, který dosahuje až 2-4 kPa, přičemž může být i nižší. Standardně se vakuuje v rozmezí 10 až 15 minut [4].

Se zvýšením afinity uhlíku ke kyslíku probíhá uhlíková reakce. Kde je možné uhlíkem redukovat jak kyslík rozpuštěný v lázni, tak i kyslík vázaný v oxidických vměsteích. Tím jsou vytvořeny vhodné podmínky pro hlubokou dezoxidaci kovu. S klesajícím obsahem kyslíku, klesá i obsah vodíku a dusíku. Odplynění také výrazně napomáhá dmýchání inertního plynu ze dna pánve. To současně i zlepšuje oduhličení oceli a její chemickou a teplotní homogenizaci. Navíc je i usnadněn přechod nekovových vměstků do strusky [4].

V praxi se pochod VD velice často kombinuje s pánvovou pecí, či injektáží prachových přísad. Při kterých se může zvýšit obsah plynů v oceli. Vzhledem k dosažení vysokého stupně dezoxidace, je při vakuování také možné provést hluboké odsíření [4].

Pochodem VD lze získat oceli s vysokým stupněm mikročistoty. Navíc pokud je vyrobena dostatečně čistá ocel již v tavicích agregátech, případně je její čistota zvýšena na některém ze zařízení sekundární metalurgie pracujícího za atmosférického tlaku. Tak je možné dosáhnout požadavků, z hlediska oxidických inkluzí, kladených na superčisté oceli-SC (SUPER CLEAN STEEL). Jelikož u procesu VD nedochází k vnějšímu ohřevu kovu, je nutné před samotným vakuováním taveninu přehřát. Přehřátí kovu závisí na typu používané pánve [4]. Schéma pochodu je znázorněno na **obr. 6**.



Obr. 6. Znázornění pochodu VD [4]

b. Pochod VOD :

U tohoto pochodu je pánve umístěna v kesonu a na hladinu je foukán kyslík a současně je ze spodu pánve dmýchán argon. Hlavní úlohou této technologie je oduhličení lázně plyným kyslíkem. Jedná se o pochod, který byl vyvíjen firmou Thyssen (bývalé západní Německo) v letech 1962 až 1967. Jeho využití je především u výroby oceli o vysokém obsahu chromu, při současně nízkém obsahu uhlíku a síry [19].

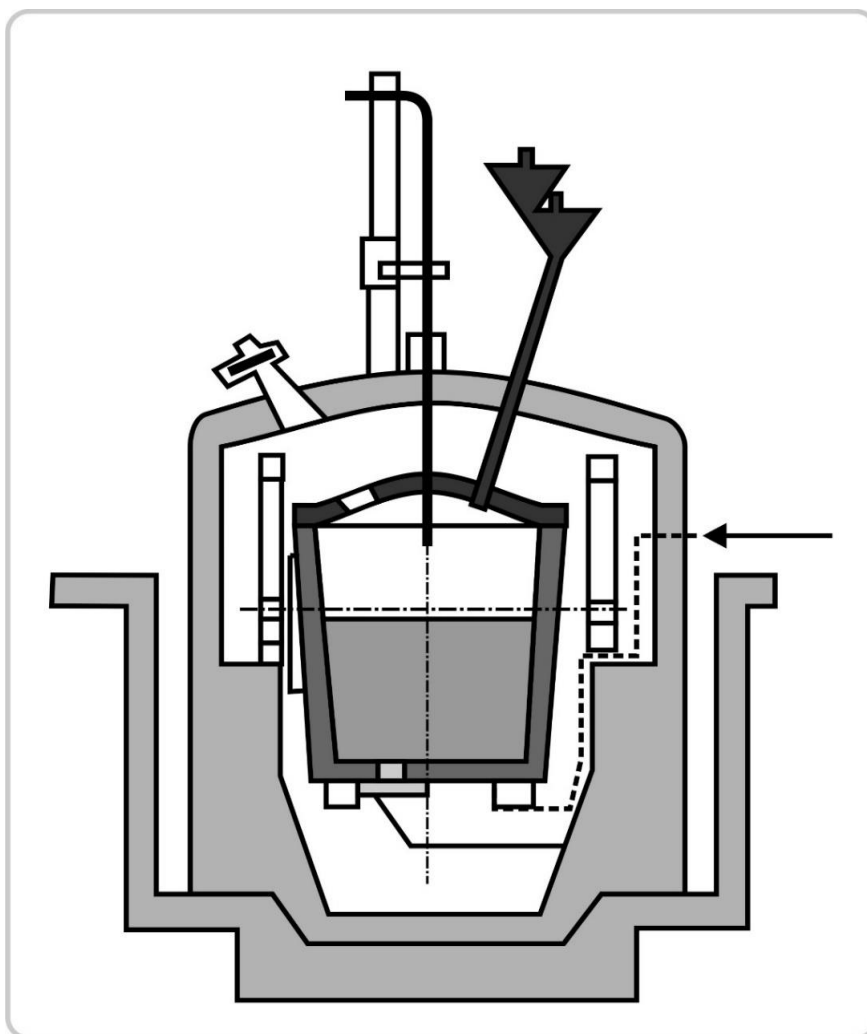
Pro výrobu kvalitních ocelí je vhodné dodržovat počáteční obsah prvků před samotným vakuováním ve vhodném rozmezí. U uhlíku se pohybuje jeho obsah mezi 0,20 až 0,40%, u manganu okolo 0,90% a u křemíku okolo 0,40%. Na konci procesu je obsah uhlíku snížen na 0,006 až 0,03%, u manganu asi na 0,6% a u křemíku na 0,15 až 0,17%. Před započetím vakuování by měla být teplota okolo 1570 °C [19].

Nejprve dochází k oxidaci křemíku a současně se snižováním jeho obsahu roste teplota oceli v pánvi. Když je obsah křemíku snížen na 0,20 až 0,25%, teprve teď dochází k oxidaci uhlíku. Rychlost oduhličování se ustálí asi během 2 až 3 minut. Následně zůstává konstantní, než je dosaženo tzv. kritického obsahu uhlíku. Poté se oduhličovací rychlost razantně snižuje. Protože závisí na difúzi uhlíku do místa reakce. Velikost tzv. kritického obsahu uhlíku je v rozmezí 0,04 až 0,10%. A je závislá na intenzitě dmýchání kyslíku a promíchávání taveniny argonem, na tlaku ve vakuové komoře a teplotě taveniny. Při jeho dosažení je ukončeno foukání kyslíku. V lázni je ho již dostatečně. Při pokračujícím dmýchání argonu společně s dalším snižováním tlaku, probíhá díky vysoké aktivitě kyslíku v tavenině i ve strusce další reakce kyslíku s uhlíkem. To vede k potřebnému douhličení lázně. Zároveň dojde i k částečné dezoxidaci oceli a strusky. Dochází také k výraznému poklesu obsahu dusíku v tavenině a to průměrně o 70%. Přičemž snížení jeho obsahu je

závislé na obsahu uhlíku před vakuováním. Pokud jde o využití chromu, dosahuje se průměrně 97,5%. Promíchávání lázně argonem se se současným oduhličováním ve vakuu působí pozitivně na proces odsíření [19].

Pochod VOD je prakticky pochod VD, který je doplněný tryskou na foukání kyslíku na hladinu lázně. Oproti výrobě na EOP má ocel, jenž prošla vakuováním lepší korozní odolnost a vyšší oxidickou čistotu [4], [19].

V roce 1975 byla tato technologie instalována ve Vítkovických železárnách pod označením „Vakuvit“. Mezi hlavní části zařízení patří keson, kde je umístěna pánev. Pánev je vybavena speciálním poklopem, který brání rozstříku. Někdy může být opatřena víkem, které je určeno ke snížení tepelného namáhání kesonu. K vakuovému kesonu je veden stabilní přívod argonu. Pánev je vyzdívána magnezitovým nebo vysocehlinitanovým stavivem. Může být vyzděna i litým žárobetonem. To je důležité pro zajištění nízké aktivity kyslíku a síry. Pochod VOD je dále vybaven systémem zajišťujícím legování oceli, jenž se skládá z pásového dopravníku, váhícího zařízení a zásobníků. Před vstupem do atmosféry jsou odsávané plyny chlazeny [4], [19]. Schéma pochodu VOD je znázorněno na **obr. 7**.



Obr. 7. Znáznornění pochodu VOD [4]

3 NEČISTOTY V OCELI

Mezi nečistoty v oceli můžeme zahrnout vměstky, plyny, škodlivé a stopové prvky. Právě jejich výskyt je jedním z hlavních činitelů, který má vliv na výsledné technologické a další užité vlastnosti oceli. Výrazní snížení jejich obsahu je možné, jen za použití sekundární metalurgie.

3.1.1 Nekovové vměstky

Vměstky jsou dle svého původu rozděleny na exogenní a endogenní.

a. Exogenní vměstky :

Jejich původ je z okolního prostředí, s nímž je ocel během své výroby ve styku. Jako okolní prostředí může být například brána atmosféra, struska a žáruvzdorný materiál. Jejich zvýšený výskyt může být důsledkem provozních nebo technologických závad. Typickým znakem je pro ně poměrně velký rozměr a heterogenita chemického složení [20].

b. Endogenní vměstky :

K jejich vzniku dochází při poklesu rozpustnosti dusíku, kyslíku a síry v železe. Mohou také vznikat v důsledku chemických reakcí dusíku, kyslíku a síry s dalšími prvky obsaženými v železe. Tvoří se poté, co jsou rozpuštěny reagující látky a dochází k dostatečnému přesycení roztoku. Tento mechanismus je platný nejen během tavení, ale po celou dobu poklesu rozpustnosti reagujících látek. A to jak při chladnutí, tak i při tuhnutí mezi likvidem a solidem. A dokonce i po krystalizaci oceli v tuhém stavu [20].

Během tavení vznikají tzv. primární vměstky. Ty se dají poměrně snadno odstraňovat, protože dochází k jejich vyplouvání a přechodu do strusky. Při odlévání vznikají tzv. sekundární vměstky. Jejich vznik je spjat se sekundární oxidací oceli, která přichází do styku s okolní atmosférou. Tento typ vměstků může vzniknout i při kontaktu oceli se žáruvzdornými materiály. Po hluboké dezoxidaci oceli je obsah kyslíku velmi nízký. Tím pádem má ocel sklon k pohlcování kyslíku. U legovaných ocelí dochází při sekundární oxidaci ke vzniku oxidických plen. Ty společně se vzniklými rozměrnými vměstky výrazně zhoršují statické a zvláště dynamické pevnostní charakteristiky vyráběných ocelí. Navíc jsou příčinou vzniku trhlin a dalších vad. Kromě kyslíku může z okolní atmosféry přecházet do oceli i dusík. To je případ ocelí legovaných případně dezoxidovaných nitridotvornými prvky. To vede opět k tvorbě vměstků, navíc je základní hmota ochuzena o prvky, které byly do oceli přidány záměrně. A jejich účelem bylo zlepšení jistých technologických a dalších užitečných vlastností ocelí. Při teplotách mezi likvidem a solidem vznikají tzv. terciární vměstky. Ty se zpravidla vyskytují v mezidendritických prostorech. V tuhém stavu vznikají difúzí tzv. precipitační vměstky. Ty jsou vyloučeny na hraničních plochách již existujících vměstků, nebo na hranicích zrn. Tyto vměstky jsou příčinou zeslabení soudržnosti zrn, na jejichž hranicích se vylučují. A tím vedou ke zhoršení mechanických vlastností oceli [20].

Pokud je použito větší množství silných dezoxidovadel, dochází k navýšení množství primárních vměstků. To má za následek snížení hmotnostního množství terciárních vměstků. Při použití tohoto postupu mluvíme o hluboké dezoxidaci oceli [20].

Snížení obsahu oxidických vměstků v oceli je možné docílit uhlíkovou reakcí. Při níž odchází kyslík z oceli spolu s uhlíkem ve formě plynu. Snížení obsahu sulfidických vměstků v oceli je možné dosáhnout použitím čistých surovin s nízkým obsahem síry. Pokud jde o snížení množství vměstků obecně (oxidických i sulfidických), tak je možné snížit jejich množství přísadou prvků, které snižují aktivitu kyslíku a síry. Vhodná je také přísada prvků, které vedou ke vzniku stabilních sloučenin. Ty se pak poměrně lehce odlučují z vyráběných ocelí [20].

- a) Oxidické vměstky - Rozpustnost kyslíku v oceli může být značně rozdílná. Má na ní velký vliv rozpustnost dalších prvků. Roste však s teplotou přibližně lineárně. Typickým představitelem oxidických vměstků v oceli je Al_2O_3 . Ten vzniká po dezoxidaci hliníkem [21].
- b) Sulfidické vměstky – Tvoří velkou část ze všech nekovových vměstků obsažených v oceli. Problémem je, že rozpustnost síry v roztaveném železe je prakticky neomezená, zatímco v tuhém stavu je velmi nízká [21].

U uhlíkových ocelí se vyskytují sulfidické vměstky ve dvou základních binárních soustavách. Konkrétně se jedná o soustavy mangan-síra a železo-síra. Přitom u uhlíkových ocelí se budou vměstky sulfidu železnatého vyskytovat při nízkém obsahu manganu [21].

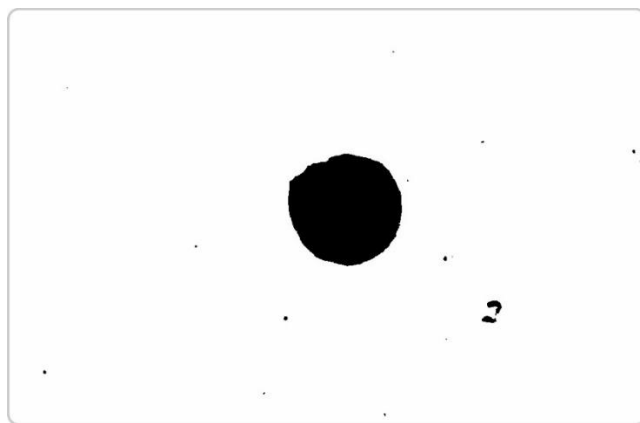
Síra má vysoký stupeň dendritické segregace. Proto se vylučuje na hranicích primárních zrn, nebo v meziosých prostorách dendritů. Což může vést k tzv. křehkosti oceli za červeného žáru [21].

Ve středně uhlíkové oceli (kolem 0,25% uhlíku) se mění tvar a složení sulfidických vměstků v závislosti na zbytkovém obsahu hliníku, který byl použit jako dezoxidovadlo. To platí při běžné dezoxidaci hliníkem, manganem a křemíkem [21].

Vměstky se v oceli dělí na několik základních typů.

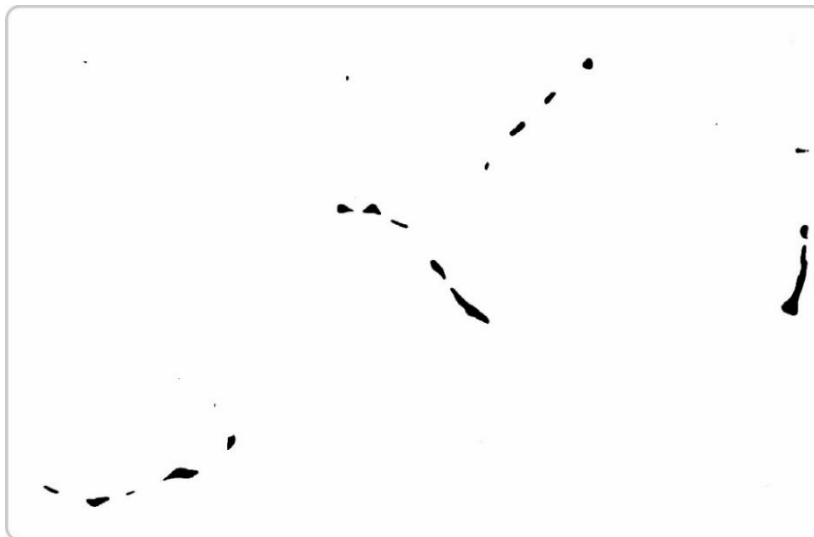
- a) I. typ vměstků – Vznikají pokud je obsah zbytkového hliníku nižší než 0,005. Jedná se o oxisulfidy, které jsou značně odolné proti deformaci. Na jejich vzniku se podílejí hliník, křemík, kyslík, mangan a síra [21]. Tento typ vměstku je zobrazen na **obr. 8**.

Vyskytují se často u polouklidněných a neuklidněných ocelí, kde je vysoká aktivita kyslíku. Tyto vměstky mají velikost od několika desítek až po stovky mikronů. Jejich rozložení v matici je náhodné. Vyskytují se u taveb, které byly nedostatečně dezoxidovány. Často je doprovází vznik bublin a bodlin [4].



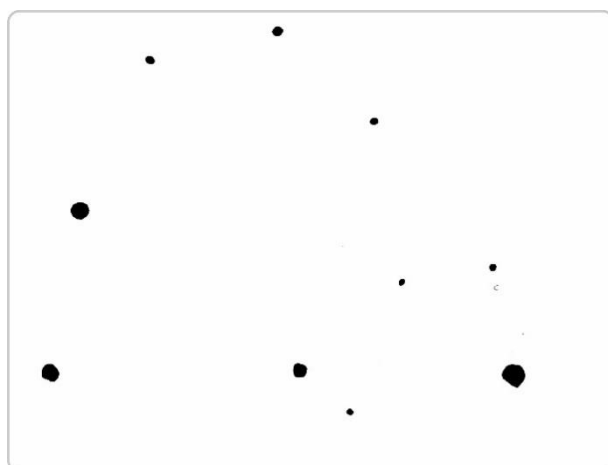
Obr. 8. Vměstek I. typu [4]

- b) II. typ vměstků – Tyto vměstky vznikají, pokud je zbytkový obsah hliníku mezi 0,005 až 0,020%. Při jejich vzniku dochází k vylučování síry až z posledních zbytků matečné taveniny. Vznikají ve formě sulfidu manganu. Drobné vměstky tohoto typu tvoří řetízky na hranicích primárních zrn. Snižují houževnatost oceli. Jejich nepříznivý vliv je zvláště patrný během tváření za tepla [21]. Sulfidy tohoto typu doprovázené oxidy III. typu jsou zobrazeny na **obr. 9**.



Obr. 9. Sulfid II. typu doprovázený oxidy III. typu [4]

- c) III. typ vměstků – Tento typ vměstku vzniká při zbytkovém obsahu hliníku vyšším než 0,020%. Sulfidická fáze tohoto typu vměstku je hranatého tvaru. Vylučována je ve formě sulfidů manganu. Tyto vměstky jsou vysoce tvařitelné. Během tváření za tepla se silně „protahují“ ve směru tváření, což může podstatně ovlivňovat mechanické vlastnosti oceli. Vznikají především u ocelí s vysokým obsahem uhlíku [21].



Obr. 10. Vměstky typu Ib [4]

zobrazen na **obr. 10**.

- d) typ vměstků Ib – Jedná se o modifikované vměstky typu III. Jsou to kulovité oxisulfidy (příp. sulfidy), jenž mají často kysličnickové jádro a sirníkovou slupku MnS či FeS[22]. Kromě hliníku byly pro dezoxidaci použity i kovy vzácných zemin. Základní fáze je tvořena sulfidy kovů vzácných zemin, v níž jsou podíly eutekticky ztuhlých oxisulfidů. Tyto vměstky se vylučují z oceli v tekuté fázi. Při vzniku vměstků tohoto typu je dosažena nízká aktivita kyslíku. Současně je dosaženo zlepšení houževnatosti a plastických vlastností oceli [4], [21]. Typ vměstku Ib je

IV. typ vměstků – K jejich vzniku dochází při nadměrném množství kovů vzácných zemin, které byly stejně jako u typu Ib použity k dezoxidaci spolu s hliníkem. Vyskytují se ve shlucích drobných komplexních sulfidů vzácných zemin. To působí nepříznivě na mechanické vlastnosti oceli [21]. Vměstky tohoto typu jsou zobrazeny na **obr. 11**.



Obr. 11. Vměstky IV. typu [4]

Pokud jsou oceli vhodně tepelně zpracovány, je jejich houževnatost závislá především na morfologii, velikosti a rozložení vměstků. U nelegovaných a nízkolegovaných ocelí na odlitky je obsah zbytkového hliníku po dezoxidaci vyšší než 0,030 %. To je nutné, aby bylo zabráněno vzniku bublin a bodlin. Při takovém obsahu hliníku vzniká stabilní oxid Al_2O_3 . Ten má teplotu tavení 2030 °C, proto se bude vyskytovat v lázni jako tuhá fáze. Z taveniny bude vyplouvat určitou rychlostí danou Stokesovým zákonem, který popisuje rovnice (3.1). Rychlost vyplouvání je závislá na velikosti a složení vměstků a také na dynamické viskozitě taveniny. Užité vlastnosti oceli jsou ovlivněny množstvím vměstků, jejich distribucí v matrici a jejich morfologií (tvarem). Morfologie vměstků je dána jejich chemickým složením. To je zase určeno podmínkami dezoxidace. Na houževnatost a tranzitní chování mají větší vliv obvykle sulfidické vměstky než vměstky oxidické [4].

$$v = \frac{2}{9} \cdot g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\eta} \cdot r^2 \quad (3.1) \quad [4]$$

kde :

v – rychlost vyplouvání vměstku [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]

r – poloměr částice [cm]

ρ_1, ρ_2 – měrná hmotnost vměstku, roztavené oceli [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

η – viskozita roztavené oceli [P]

g – tíhové zrychlení [$981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$]

U ocelí na odlitky jsou spjaty zhoršené mechanické vlastnosti s výskytem sulfidických vměstků II. typu. Lepších mechanických vlastností je dosaženo, pokud se v oceli vyskytují sulfidické vměstky III. typu. Ty však vzhledem ke svému ostrohrannému tvaru mohou působit jako koncentrátoři napětí. Proto je vhodné, modifikovat je na typ Ib jejich globularizací [21].

U odlitkové oceli má vliv na mechanické vlastnosti především obsah síry a typ sulfidických vměstků. U oceli na ingoty má vliv i tvařitelnost jednotlivých typů vměstků. Pokud vzroste stupeň plastické deformace, narůstá rozdíl mezi místní deformací u rohu vměstku a homogenní deformací matrice. To může mít za následek prasknutí vměstku a vytvoření dutinky. Největší vliv má nehomogenita plastické deformace u velkých ostrohranných vměstků. Dále jelikož je plastická deformace kovové matrice v okolí vměstku vyšší, dojde v okolí vměstku dříve k vyčerpání plasticity matrice [20].

U plastického materiálu bude škodlivý vliv vměstků menší. U těchto materiálů jsou špičky napětí odbourávány plastickou deformací. Naopak u materiálů se špatnými plastickými vlastnostmi mohou již malé vady způsobené vměstkem, být příčinou předčasného lomu [20].

3.1.2 Další nečistoty v oceli

Kromě vměstků mají podstatný vliv na vlastnosti oceli i plyny, škodlivé prvky a stopové prvky. Mezi škodlivé prvky patří fosfor a síra a o jejich negativním vlivu na vlastnosti oceli bylo již pojednáno v první kapitole.

- a) Vliv plynů na vlastnosti oceli : - U oceli se sleduje a hodnotí vliv plynů, konkrétně se hodnotí vliv vodíku, dusíku a kyslíku. Každý z těchto plynů ovlivňuje vlastnosti oceli odlišným způsobem [21].

Vodík významně ovlivňuje vlastnosti oceli. Rozpustnost vodíku u oceli se snižuje s klesající teplotou. Při teplotě tuhnutí se pohybuje okolo 7ppm. Pokud není dosaženo snížení obsahu vodíku pod tuto hranici, objeví se v již ztuhlé oceli vodíkové bubliny. Ovšem i pokud je obsah vodíku nižší a nedochází ke vzniku vodíkových bublin, může dojít ke zhoršení užitečných vlastností oceli a ke vzniku vlasových trhlin (vloček). Zamezit vzniku vlasových trhlin je možné použitím vhodné vakuové rafinace [21].

Dusík je taktéž významným činitelem ovlivňujícím vlastnosti oceli. Problémem rozpuštěného dusíku ve ztuhlé oceli je to, že precipituje jako samostatná fáze. To vede ke „stárnutí“ oceli [21].

Pokud jde o kyslík, tak jeho vliv je patrný především při tvorbě oxidických vměstků. Tím pádem je jeho vliv na vlastnosti a čistotu oceli značný [21].

- b) Vliv stopových prvků na vlastnosti oceli . – Stopové prvky se do oceli dostávají především ze vsázky a feroslitin. Jejich rozpustnost výrazně klesá s klesající teplotou. Jejich nepříznivý vliv je ještě umocněn tím, že se při běžných ocelářských pochodech neodstraňují. Mají výrazně odlišné chemické a fyzikální vlastnosti než železo a proto při tuhnutí dochází k jejich odměšování. Většinou se chovají jako povrchově aktivní látky, proto se soustřeďují na energeticky výhodných místech, kde je porušena stavba mřížky. Může se jednat o různé typy fázových rozhraní. U stopových prvků při tvářecích teplotách dochází k jejich tavení. Potom mají snahu pronikat po hranicích austenitických zrn. Následně každá tvářecí operace, která způsobí vznik tahového napětí v povrchové vrstvě, může vést ke vzniku trhlin. Stopové prvky jsou sledovány u odlitků a výkovků s velkými průměry a tloušťkami stěn určených pro energetické jednotky velkých výkonů. U těchto odlitků a výkovků jsou totiž kladeny zvýšené nároky na plastické a mechanické vlastnosti oceli a to i za vyšších teplot [21].

4 VLASTNOSTI OCELI

Tato práce se zabývá vlivem použití sekundární metalurgie na vlastnosti oceli. Proto je také nutné zmínit se o vlastnostech oceli. V této práci budou zmíněny některé z vlastností oceli. Konkrétně se bude jednat o technologické vlastnosti. Pokud jde o mechanické vlastnosti oceli, v této práci není prostor, aby zde byly zpracovávány. Dále budou probírány některé vybrané chemické prvky, které vlastnosti oceli výrazně ovlivňují.

4.1 Vliv jednotlivých prvků na technologii výroby oceli a její vlastnosti

Výsledné vlastnosti jsou z velké části dány chemickým složením. Proto je nutné znát vliv jednotlivých prvků jak z hlediska výsledných vlastností oceli, tak i z hlediska technologie výroby.

4.1.1 Uhlík

Přítomnost uhlíku v železe podstatně mění jeho vlastnosti. K tomu, aby k těmto změnám došlo, stačí i velmi nízké obsahy uhlíku. Samotné čisté železo vykazuje velmi nízkou pevnost a je měkké. Přísadou uhlíku se výrazně zvýší tvrdost, kontrakce, nárazová práce, mez kluzu, mez pevnosti, ale i technologické vlastnosti železné slitiny [4].

Uhlík se do oceli dostává pomocí nauhličovadel a ze vsázky. Jako nauhličovadlo se používá běžně koks a okuje. Pokud je zapotřebí zajistit přesný obsah uhlíku, jsou používány k nauhličení feroslitiny. Zvláště se jedná o ferochrom a feromangan, jenž mají dostatečně velký obsah uhlíku. Pokud je vysoký obsah uhlíku ve vsázce, snižuje se propal železa a spotřeba elektrické energie na natavení [4].

Pokud je v oceli vysoký obsah uhlíku, volí se oxidace plynným kyslíkem. Při nižším obsahu uhlíku je možné použít pouze železnou rudu. V praxi se často oba způsoby kombinují. Po natavení by měl být obsah uhlíku vyšší než 0,5% a zároveň o 0,3% minimálně vyšší než požadovaný obsah uhlíku na konci oxidačního údobí. Důvodem je, aby při uhlíkovém varu došlo ke snížení obsahu dusíku a vodíku skrze bubliny oxidu uhelnatého [4].

Uhlík je rozpuštěn v železe intersticiálně. Míra jeho rozpustnosti je závislá na teplotě, tj. na modifikaci železa. Když obsah uhlíku překročí mez rozpustnosti, uhlík se začne vázat na karbidy. popřípadě na karbonitridy [23].

Se změnou obsahu uhlíku se mění teplota solidu. V rozsahu obsahu uhlíku od 0,05 do 1,2% klesá teplota solidu z teplot okolo 1450 °C na teploty pohybující se okolo 1200 °C. U ocelí s obsahem uhlíku nad 1% se zužuje teplotní interval tváření. Tento pokles může být až o 200 °C. Horní přípustné teploty jsou omezeny sklonem oceli k přehřátí a fyzikálně chemickými procesy na povrchu ohříváního materiálu (např. tvorba okují) [23].

Na základě obsahu uhlíku tuhnou oceli následovně :

1. $T_{av} + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta + \gamma \rightarrow \gamma$ – pro obsah uhlíku do 0,1% [23]
2. $T_{av} + \delta \rightarrow \delta + \gamma \rightarrow \gamma$ – pro obsah uhlíku od 0,1 do 0,2% [23]
3. $T_{av} + \delta \rightarrow \gamma$ – pro obsah uhlíku okolo 0,2% [23]
4. $T_{av} + \delta \rightarrow T_{av} + \gamma \rightarrow \gamma$ – pro obsah uhlíku od 0,2 do 0,4% [23]
5. $T_{av} + \gamma \rightarrow \gamma$ – pro obsah uhlíku nad 0,4% [23]

Čím vyšší je teplota vzniku austenitu, tím více se zvyšuje pravděpodobnost zhrubnutí lící struktury. Dalším významným faktorem při tužení je rozdíl mezi teplotami likvidu a

solidu. Pokud je tento rozdíl teplot podstatně větší, tak u ocelí s vyšším obsahem uhlíku podporuje segregační jevy. Při dolních teplotách tváření mohou vzniknout heterogenní strukturní stavy, které mohou zhoršit podmínky pro tváření [23].

U ocelí dochází ke vzniku karbidu Fe_3C (cementit), pokud se v oceli vyskytují další karbidotvorné prvky kromě uhlíku, mohou se v oceli vyskytovat i směsné karbidy [23].

Uhlík hraje významnou roli při růstu austenitických zrn. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku klesá teplota kritického růstu austenitického zrna. U ocelí s obsahem uhlíku do 0,25% dochází ke kritickému růstu austenitického zrna až při teplotě 1300 °C. U středněuhlíkových ocelí se tyto teploty pohybují už okolo 1250 °C a u ocelí s vysokým obsahem uhlíku může k tomuto jevu dojít již v intervalu teplot od 1150 do 1200 °C [23].

Množství uhlíku v oceli také výrazným způsobem ovlivňuje za jakých teplot bude mít ocel s daným obsahem uhlíku nejlepší plastické vlastnosti. Nízkouhlíkové oceli mají nejlepší plastické vlastnosti až kolem teplot 1300 až 1320 °C. U středně uhlíkových ocelí se tyto teploty pohybují okolo 1000 až 1200 °C. U ocelí s vysokým obsahem uhlíku nastávají tyto teploty již v rozmezí 900 až 1100 °C. S rostoucím obsahem uhlíku dochází také ke zvýšení náchylnosti k přehřátí [23].

4.1.2 Mangan

Jedná se o austenitotvorný prvek, avšak jeho vliv na rozšíření oblasti austenitu je nižší než u niklu. Mangan zpomaluje fázovou přeměnu γ -železa na α -železo, jelikož mangan snižuje teplotu této přeměny. Snižuje teploty A_3 a A_1 , teplotu A_4 naopak zvyšuje [23].

Při obsazích manganu, které se používají běžně pro legování oceli, je v oceli plně rozpustný. Je to prvek, který má slabší afinitu ke kyslíku a střední afinitu k síře. U karbidů Fe_3C může nahrazovat atomy železa, protože mangan má podobnou velikost atomu jako železo [23].

Mangan je prvek, který má slabší dezoxidační účinek. Mangan také snižuje tepelnou vodivost a zvyšuje náchylnost k přehřátí. Vzhledem ke skutečnosti, že mangan má vyšší afinitu k síře než železo, dochází ke změně sulfidů FeS na sulfidy MnS . Může dojít i ke vzniku komplexních sulfidů MnS.FeS . Sulfidy MnS mají vyšší teplotu tavení a snižují tak sklon oceli ke křehkosti za tepla. Sulfid FeS dosahuje teploty tavení při 1100 °C, zatímco sulfid MnS dosahuje teploty tavení asi při teplotě 1620 °C. U většiny ocelí se převážně vyskytuje komplexní sulfid FeS.MnS . Jedná se o tuhý roztok FeS v MnS o různém poměru obou sulfidů [23].

Překročí-li obsah manganu asi 2 až 4% dochází ke snížení překrystalizačních teplot a ke zpomalení překrystalisace. To je tak velké, že se již při pomalém ochlazování začíná ve struktuře objevovat martenzit. S rostoucím obsahem manganu roste podíl martenzitu ve struktuře, až je struktura pouze martenzitická. Potom je tato ocel nazývána samokalitelnou, protože se již při pomalém ochlazení sama zakalí. [24]

4.1.3 Křemík

Při množství křemíku okolo 0,2 a 0,5% se křemík vyskytuje v oceli jako dezoxidační přísada. U ocelí konstrukčních, nástrojových a opaluvzdorných se obsah křemíku pohybuje v rozmezí od 1 do 2%. U elektrotechnických ocelí může být obsah křemíku až do 6%. Tvařitelnost těchto ocelí závisí výrazně na strukturním stavu, ten je ovlivněn nejen obsahem křemíku, ale především obsahem uhlíku a dalších příměsí (např. hliník, mangan, nikl atd.) [23].

Křemík posouvá eutektoidní přeměnu k nižším koncentracím uhlíku a zároveň snižuje rozpustnost uhlíku v austenitu [23].

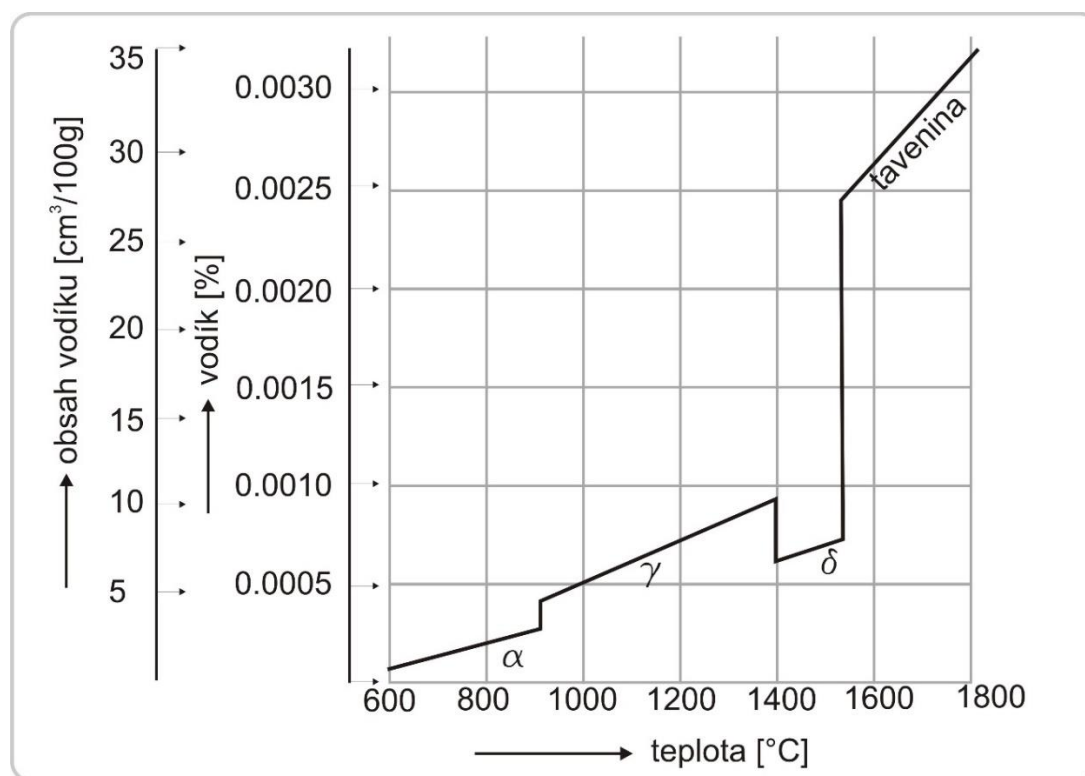
Teplotní oblast existence austenitu u ocelí, u kterých je obsah křemíku okolo 1%, je v rozmezí teplot od 900 do 1275 °C. Pokud obsah křemíku vzroste na 1,5%, dojde k zužení teplotní existence austenitu na 1000 až 1250 °C. U ocelí s ještě vyšším obsahem křemíku vzniká dvoufázová struktura a tvařitelnost těchto ocelí prudce klesá [23].

Křemík také při tváření za tepla způsobuje u ocelí náchylnost k červenému lomu, oduhličování povrchu a vznik kompaktnější vrstvy okují s nižším součinitelem tření [23].

4.1.4 Vodík

Vodík je v oceli nežádoucím prvkem. Negativně ovlivňuje plastické vlastnosti materiálu, zejména jeho houževnatost. U odlitkové oceli bývá často původcem vzniku bublin v odlitcích. Vodík také výrazně ovlivňuje makrostrukturu v litém stavu, především pokud jde o segregaci a vznik bublin [4].

Rozpustnost vodíku není stálá, ale je závislá na chemické složení oceli, teplotě a tlaku vodíku [4]. Závislost obsahu vodíku na teplotě je znázorněna na **obr. 12**.



Obr. 12. Závislost obsahu vodíku na teplotě [4]

Z grafu je patrné, že rozpustnost vodíku je výrazně vyšší v tekutém stavu než ve stavu pevném. Rozpustnost vodíku zlepšují kobalt, mangan a nikl. Naopak rozpustnost vodíku snižují křemík, hliník, chrom a uhlík [4].

Ať už je modifikace železa jakákoli, vodík se v oceli rozpouští intersticiálně. Jeho rozpustnost v železe γ je podstatně větší než v železe α a δ. Což je také znázorněno na obr. 12. Proto se také rozpustnost vodíku při fázových přeměnách výrazně mění. S klesající teplotou se rozpustnost vodíku snižuje natolik, že za normálních teplot je velmi nízká [4].

Zvýšená koncentrace vodíku je v jádrových částech a jeho rozložení v průřezu není rovnoměrné. Vodík má nejmenší atomový poloměr ze všech prvků, proto také probíhá difúze vodíku ze všech prvků, které se běžně vyskytují v oceli nejrychleji.

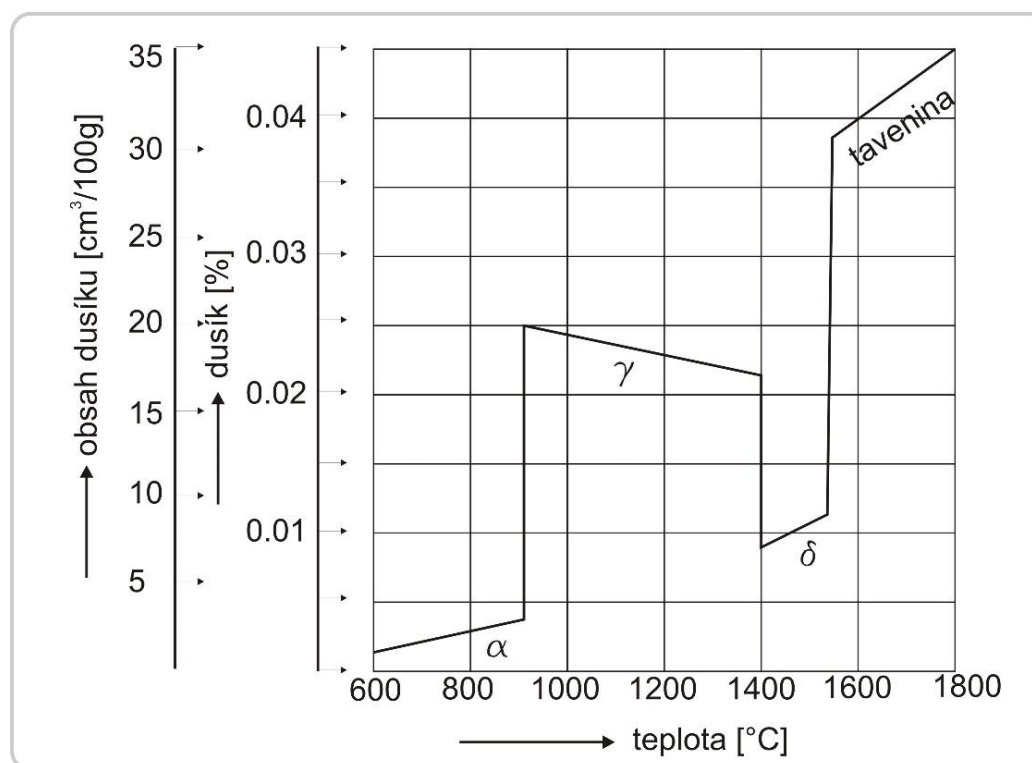
Vodík přechází do oceli při její výrobě z vápna a pecní atmosféry, jenž obsahuje vodu ve formě vodní páry. Obsah vody, která je obsažena ve vápně by neměl překročit 1%.

Množství vodíku v oceli může výrazně narůst, pokud se zhorší těsnost některého z chladičů v peci. Protože dojde ke zvýšení množství vody v pecní atmosféře [4].

4.1.5 Dusík

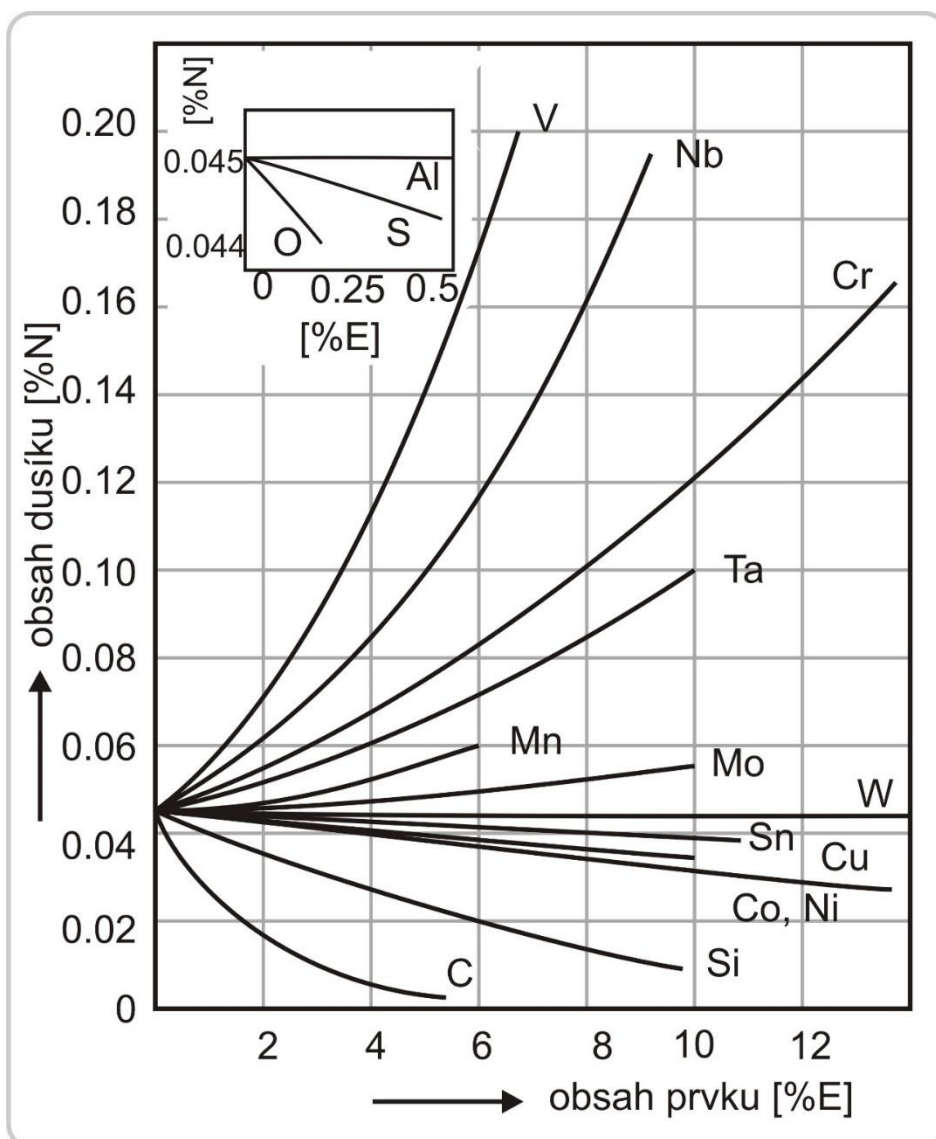
Jako nežádoucí prvek je dusík považován u většiny nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Atom dusíku je o 36% menší než atom železa. Proto může se železem tvořit intersticiální tuhý roztok. Dusík je také prvkem rozšiřujícím oblast austenitu [4], [23].

V oceli tvoří nitridy především s hliníkem, niobem, vanadem a titanem. Tyto nitridy zjemňují zrna, ale i precipitačně zpevňují, brzdí rekrytalizaci a tím i zhoršují tvařitelnost oceli [25]. S rozpuštěným dusíkem v tuhém roztoku roste tvrdost, s níž dochází ke zvýšení přetvárných odporů [23]. Dusík se však v tekuté oceli rozpouští poměrně málo a při tuhnutí se jeho rozpustnost dále snižuje. Jak je patrné z **obr. 13**. Rozpustnost dusíku je podobně jako u vodíku nejvyšší v železe γ . Rozdíl oproti rozpustnosti v železe α a δ je ještě výraznější, než je tomu u vodíku. Při vyšším obsahu dusíku dochází k jeho vylučování ve formě plynů, s čímž roste riziko vzniku dutin.



Obr. 13. Rozpustnost vodíku v závislosti na teplotě [4]

Působení dusíku v oceli je podstatně ovlivněno prvky, které mají vliv na rozpustnost dusíku v tekutém, ale především v tuhém stavu. Mezi prvky zvyšující jeho rozpustnost v oceli patří molybden, mangan, tantal, chrom, niob a vanad. Jeho rozpustnost naopak snižují cín, měď, nikl, křemík, uhlík, síra a kyslík [23]. Vše je názorně ukázáno na **obr. 14**.



Obr. 14. Vliv obsahu jednotlivých prvků na rozpustnost dusíku v oceli [4]

Přítomnost dusíku v oceli může vést k jejímu „stárnutí“, jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole. To je doprovázeno negativním dopadem na některé z materiálových vlastností oceli. Především se tento problém týká vrubové houževnatosti a tažnosti. Zabránit stárnutí oceli je možné přidáním prvků s vysokou afinitou k dusíku. Zejména se jedná o hliník a titan. Ty vážou dusík na nitridy. Avšak za určitých koncentrací dusíku a hliníku může dojít ke vzniku lasturových lomů [4].

4.2 Technologické vlastnosti oceli

Každý výrobek vyrobený z oceli se nějak technologicky zpracovává. Dobrá znalost technologických vlastností daného materiálu je nezbytná pro jeho správné zpracování. Mezi technologické vlastnosti oceli je možné zařadit tvařitelnost, svařitelnost, obrobitelnost.

4.2.1 Tvařitelnost oceli

Mimo oceli na odlitky je veškerá světová produkce oceli zpracovávána některou z technologií tváření. Ať již se jedná o kování ingotů, nebo o válcování Bramů a sochorů.

Proto je tvařitelnost oceli jednou z jejich klíčových vlastností. Příklad kování ingotu v kovárně ŽDAS a.s. je na **obr. 15**.



Obr. 15. Kování na kovacím lisu [26]

Tvařitelnost je možné definovat jako schopnost tělesa plasticky se deformovat za určitých podmínek tváření až do porušení soudržnosti. Klíčovým faktorem ovlivňujícím tvařitelnost oceli je její plastičnost. Vliv mají také podmínky tváření, tvar a rozměry konkrétních tvářených těles. Při navrhování technologie tváření je nutné vzít v potaz mezní tvařitelnost celého tvářeného objemu. Ta je dána mezní tvařitelností elementárního objemu, jenž je vzhledem k podmínkám tváření v celém objemu nejnepríznivější. Tím, je míněno, že při překročení mezní tvařitelnosti tohoto elementárního objemu by došlo k makroporušení celého objemu tvářeného kovu [23].

Pro jednotlivé tvářecí operace je důležitá technologická tvařitelnost. Při jejím hodnocení jsou již určité podmínky tváření blíže specifikovány. Je možné se setkat i s pojmy kovatelnost a válcovatelnost. Částí technologické tvařitelnosti je metalurgická tvařitelnost. Ta se zabývá vlivem metalurgických činitelů na tvařitelnost a to za daných termomechanických podmínek. Vzhledem k zaměření práce bude o metalurgických činitelích pojednáno více se zaměřením na tvařitelnost oceli za tepla. [23].

Nejvýznamnějším metalurgickým činitelem je chemické složení. Jeho vliv na tvařitelnost je nutné posuzovat z několika hledisek. Konkrétně z hlediska ovlivnění strukturního stavu oceli v oblasti teplot tváření a teplot fázových přeměn. Dále z hlediska rozpustnosti v základní struktuře a ve způsobu výskytu nerozpuštěných příměsí. Dalším důležitým faktorem je afinita příměsových prvků zejména k uhlíku, kyslíku, dusíku a síře a vlastnosti vznikajících sloučenin. Opomenout se nesmí ani hledisko ovlivnění a kinetiky difúzí aktivovaných dějů [23].

Pokud jde o vliv prvků na strukturní stav oceli, tak je možné prvky rozdělit na prvky, rozšiřující α -oblast železa a na prvky, rozšiřující γ -oblast železa. Mezi prvky rozšiřující γ -oblast železa až do pokojové teploty je možné zařadit kobalt, mangan a nikl. Dalšími prvky rozšiřujícími γ -oblast železa jsou dusík, uhlík a zinek. Při jejich použití je však γ -oblast

železa omezená dalšími fázemi a je stabilní pouze v určité oblasti teplot. Prvky, které rozšiřují α -oblast železa jsou beryllium, hliník, křemík, fosfor, titan, vanad, chrom, arzen, niob, molybden, cín, antimon, tantal a wolfram. Tyto prvky úplně uzavírají γ -oblast železa. Také bor, cer a zirkonium rozšiřují α -oblast železa, ale neuzavírají plně γ -oblast železa [23].

Pokud dochází k působení několika prvků zároveň, tak jejich účinek není lineární, nýbrž je proměnlivý na základě jejich vzájemného působení. Je nutné podotknout, že většina z prvků rozšiřujících α -oblast železa zvyšuje teplotu A3 a zároveň snižuje teplotu A4. U prvků které rozšiřují γ -oblast železa je tomu přesně naopak [23].

Kromě manganu všechny karbidotvorné prvky zmenšují γ -oblast železa. Patří mezi ně, již zmiňovaný mangan, dále chrom wolfram, molybden, vanad, titan, zirkonium, tantal, niob a bor. Tyto prvky mají převážně malé atomové poloměry a v periodické soustavě prvků jsou nalevo od železa. Jejich stabilita roste s rostoucím poloměrem atomu. Stabilní karbidy jsou stálejší za vyšších teplot. To je důvodem jejich horší rozpustnosti při ohřevu. Navíc tyto karbidy při vyšších teplotách precipitují [23].

Se zužením γ -oblast železa se zmenšuje interval teplot pro tváření za tepla. I výskyt vměstků zhoršuje podmínky pro tváření, především pokud se jedná o vměstky druhého typu [23].

4.2.2 Obrobitelnost oceli

Obrobitelnost nelze považovat za obecně platně definovatelnou standardizovanou vlastnost materiálu. Je možné ji chápat jako souhrn vlastností obráběného materiálu pro výrobu součástí konkrétním způsobem obrábění [27].

Experimentálně je pomocí různých zkoušek zjišťována relativní obrobitelnost materiálu. Obecně se jedná o stanovení a číselné vyjádření o kolik se zkoušený materiál liší od materiálu srovnávacího – etalonu [28].

Ke zhodnocení obrobitelnosti materiálu, tedy schopnosti být obráběn, je zapotřebí uvážit materiál obrobku z metalurgického hlediska a z pohledu mechanických vlastností. Dále je třeba posoudit zvolenou geometrii bříty. Také je zapotřebí zhodnotit nástrojový materiál a oprávněnost jeho volby [29].

Z hlediska metalurgického zpracování mají na výslednou obrobitelnost oceli vliv vměstky v ní obsažené. Nejvíce negativně na obrobitelnost materiálu působí oxidy hliníku a karbidy titanu: Metalurgickým zpracováním lze obrobitelnost zlepšit přidáním síry, která se běžně přidává do automatových ocelí [27].

4.2.3 Svařitelnost oceli

Svařitelnost podobně jako obrobitelnost není jednoduché definovat. Je totiž závislá na podmínkách svařování. Jako svařitelný je možné označit takový materiál, u kterého bude svár i bez použití zvláštních opatření bez dutin a trhlin. A jeho mechanické vlastnosti budou blízké původnímu materiálu [30].

Při svařování vzniká tepelně ovlivněná oblast. Pokud jsou svařovány nelegované oceli, je zapotřebí vzít v úvahu, že za přítomnosti uhlíku v tepelně ovlivněné oblasti dojde ke zvýšení tvrdosti. O všem to vede zároveň ke snížení plasticity. Dochází tak ke vzniku vnitřních pnutí, které mohou vést ke vzniku trhlin. Za vysokých teplot ovlivnění je možné také pozorovat změny rozložení precipitátů a zhrubnutí primárního zrna. Tepelně ovlivněná oblast je integrální součástí svarového spoje, proto její vlastnosti budou ovlivňovat celkovou nosnost svarového spoje [31], [32].

5 VLIV SEKUNDÁRNÍ METALURGIE NA VLASTNOSTI A ČISTOTU OCELI

Je zcela jasné, že sekundární metalurgie má velký vliv na vlastnosti a čistotu vyráběné oceli. Jejím použitím je ovlivněno množství a morfologie vměstků a koncentrace prvků a dalších nečistot. To následně významně ovlivňuje i výsledné mechanické a technologické vlastnosti ocelových výrobků. Aby byl vliv sekundární metalurgie u výroby oceli lépe vykreslen, jsou pro tuto práci použita data ze společnosti ŽDAS a.s., některé jejich vlastní výsledky prezentované na konferencích. Všechny zde prezentované výsledky proto odpovídají podmínkám ŽDAS a.s.

5.1 Vliv sekundární metalurgie na koncentraci síry a kyslíku v oceli

Z hlediska tavení oceli má právě koncentrace síry, kyslíku popřípadě dusíku největší vliv na metalografickou čistotu oceli. Ta slouží k určení stupně znečištění oceli nekovovými vměstkami. Kromě samotného množství nekovových vměstků hraje významnou roli určení stupně znečištění i velikost a rozmístění vměstků v matici [33].

Při výrobě oceli ve slévárně a ingotárně ŽDAS a.s. jsou jako primární tavící agregáty používány tři elektrické obloukové pece (EOP). Pro mimopecní zpracování oceli jsou k dispozici dvě pánvové pece, kde je jedna z nich vybavena navíc indukčním míchačem (technologie LF/MS). Mimopecní zpracování za sníženého tlaku je realizováno pomocí moderní VD/VOD stanice. Základními kombinacemi taveb na těchto zařízeních je EOP, EOP/LF, EOP/LF/VD. Z posouzení naměřených hodnot u těchto technologií je možné si odvodit do jaké míry má použití sekundární metalurgie vliv na snížení obsahu kyslíku a síry.

Koncentrace kyslíku a síry byla sledována v letech 2000 až 2012 ve ŽDAS a.s. u chrommolybdenových a chrommolybdenvanadových ocelí. Konkrétně se jednalo o ocelové odlitky pro tlaková zařízení dle ČSN EN 10213 [33]. Koncentrace kyslíku u jednotlivých základních technologií je uvedena v **tab. 1**.

Tab.1. Koncentrace kyslíku v oceli na odlitky použité pro tlaková zařízení [33]

Období 2000 až 2012	IOI (ppm)				
	AVG	min	max	směrodatná odchylka	počet hodnot
Technologie					
EOP	87	41	160	21	260
EOP/LF	64	22	144	18	273
EOP/LF/VD	30	13	60	14	9

pozn. AVG...průměrná koncentrace

Jak je ze zpracovaných hodnot patrné průměrná koncentrace kyslíku se s použitím sekundární metalurgie snížila. Pokud bylo použito společně se zařízením LF i zařízením VD tak se obsah kyslíku snížil výrazně. Stejně je to i s hodnotami směrodatné odchylky, které klesaly s použitím pochodů sekundární metalurgie. Což ukazuje také na stabilnější dosahované výsledky u jednotlivých taveb. U technologie EOP/LF/VD, jak již bylo zmíněno ve druhé kapitole, roste během vakuování afinita uhlíku ke kyslíku, což může být jedním z faktorů tak výrazného snížení obsahu kyslíku v oceli. Nicméně je nutné dodat, že u technologie EOP/LF/VD je k dispozici pouze 9 hodnot oproti technologiím EOP, EOP/LF u nichž je počet v řádu stovek. Což může zavádět, ale přesto bylo u všech taveb dosaženo nižšího množství kyslíku než u výroby oceli pouze v EOP [33].

Podobně tomu je i u koncentrací síry, kde je také dosaženo nejlepších výsledků u technologie EOP/LF/VD. A zlepšených výsledků za použití technologie EOP/LF než u tavby na samotné EOP. Přitom lepšího odsíření jeho dosaženo díky vyššímu stupni dezoxidace kovu. Tomu také odpovídají výsledky, kde je výchozí koncentrace kyslíku nižší, je možné i více snížit koncentraci síry [33]. Tomu odpovídají i hodnoty obsažené v **tab. 2**.

Tab.2. Koncentrace síry v oceli na odlitky použité pro tlaková zařízení [33]

Období 2000 až 2012	/S/ (ppm)				
Technologie	AVG	min	max	směrodatná odchylka	počet hodnot
EOP	71	30	150	20	260
EOP/LF	29	10	80	11	273
EOP/LF/VD	18	10	30	6	9

Z těchto výsledků je patrné, že použití sekundární metalurgie vede ke snížení obsahu kyslíku a síry v tavenině. S čímž roste metalografická čistota oceli a snižuje se podíl nekovových vměstků. Vzhledem k vyšší metalografické čistotě je možné počítat se zvýšením parametrů užitných vlastností oceli, zejména tedy meze kluzu a houževnatosti. Lze také očekávat snížení vad související s kyslíkem a sírou [33].

5.1.1 Příklad výsledků řešení a optimalizace výroby

Při použití postupů sekundární metalurgie je možné dosahovat standartních výsledků chemického složení oceli. Výsledná kvalita výrobků je však významně ovlivněna také úrovní technologie [33].

Tento jev bude vysvětlen na příkladu výroby a optimalizace technologie pro výkovek z austenitické oceli 08Ch18N10T podle ruské normy GOST 5632. Bude ukázána změna koncentrace kyslíku a síry v závislosti na změně technologie [33].

Původní technologický postup se skládal z EOP/LF/VOD/VCD/VD (VCD = Vakuová uhlíková desoxidace). Technologický postup byl však optimalizován, po vakuovém zpracování byla dále ještě zařazena rafinace na pánvové peci. Technologický postup po optimalizaci výroby proto vypadal následovně EOP/LF/VOD/VCD/VD/LF. Tento nový technologický postup zahrnoval změnu dezoxidace oceli. Změnou prošel také způsob legování. Legování bylo prováděno prvky s vysokou afinitou ke kyslíku, konkrétně se jednalo o bór a titan [33].

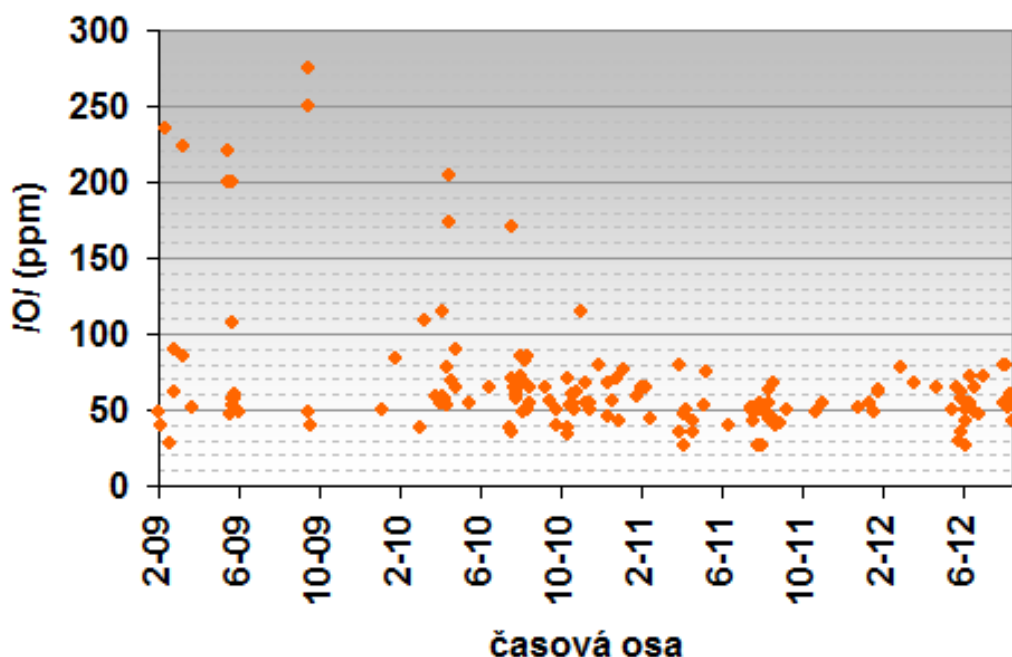
V **tab. 3** jsou zaznamenány údaje o koncentraci kyslíku ve finální tavenině v období od ledna 2009 do června 2011, které odpovídají technologii EOP/LF/VOD/VCD/VD a údaje z období od července 2011 do srpna 2012, kde již byla aplikována optimalizovaná technologie EOP/LF/VOD/VCD/VD/LF [33].

Tab. 3. Koncentrace kyslíku v oceli 08Ch18N10T [33]

Období	/O/ (ppm)				
	AVG	min	max	směrodatná odchylka	počet hodnot
1/2009 až 6/2011	78	27	275	52	105
7/2011 až 8/2012	53	26	80	13	52

Z údajů je patrné, že průměrná koncentrace kyslíku klesla se změnou technologie ze 78ppm o 25ppm na hodnotu 53ppm. Jedná se tedy o snížení o 32%. Došlo také k výraznému snížení směrodatné odchylky. Což vypovídá o stabilizaci celého procesu [33].

Stabilizace procesu je vidět ze změny rozložení hodnot koncentrací kyslíku v čase jak ukazuje **obr. 16**.



Obr. 16. Koncentrace kyslíku v oceli 08Ch18N10T [33]

Vliv optimalizace výroby je patrný i u koncentrací síry. Kdy se změnou technologie bylo zlepšeno odsíření [33]. Koncentrace síry před a po změně technologie je doložena v **tab. 4**.

Tab. 4. Koncentrace síry v oceli 08Ch18N10T [33]

Období	[S] (ppm)				
	AVG	min	max	směrodatná odchylka	počet hodnot
1/2009 až 6/2011	42	10	90	18	105
7/2011 až 8/2012	32	20	70	9	52

Průměrná koncentrace síry v oceli 08Ch18N10T byla snížena ze 42ppm o 10ppm na hodnotu 32ppm. Podstatně se snížila i směrodatná odchylka, z čehož plyne, že se technologický proces povedlo více stabilizovat [33].

Snížení koncentrace nežádoucích prvků v tavenině, kyslíku a síry, se podílí na zlepšení vnitřní a povrchové kvality odlitků a výkovků s přímou návazností na zvýšení parametrů užitných vlastností oceli [33].

5.1.2 Vliv způsobu odběru vzorku tekuté oceli na naměřený obsah kyslíku

Při zjišťování koncentrace kyslíku se není možné obejít bez spolehlivých měřících metod. U měření koncentrace kyslíku v oceli se standardně používají dvě metody. A to klasický odběr vzorku pomocí naběračky s následným nalitím tekuté oceli do měděné kokilky a poloautomatický odběr vzorku pomocí sondy a pneumatické jednotky (odběr vzorku zařízením T.O.S.). Při vyhodnocování experimentálních a provozních dat je nutné vzít

v potaz, že při odběru vzorku do měděné kokilky je vždy naměřeno asi 10ppm více než u odběru vzorku pomocí zařízení T.O.S. Při odběru vzorku pomocí zařízení T.O.S není vzorek kontaminován struskou ani jinými nečistotami, navíc není ani zoxidován a neobsahuje dutiny. Výhodou je také, že odběr vzorku není ovlivněn operátorem [33], [34].

5.2 Vliv sekundární metalurgie na objem vad a mechanické vlastnosti odlitků

Pochody sekundární metalurgie byly ve ŽDAS a.s. v prvních letech po jejich zavedení (LF bylo zavedeno v roce 1996 a VD/VOD/VCD v roce 2000) byly používány především na výrobu ingotů pro externí zákazníky a vlastní kovárnu. U ocelí na odlitky procházely pochody sekundární metalurgie pouze korozivzdorné a žárupevné oceli. Avšak v pozdějších letech došlo k výraznému nárůstu uhlíkových a středně legovaných ocelí na odlitky zpracovávaných na zařízeních sekundární metalurgie [35].

5.2.1 Vyhodnocení celkové produkce objemu vad u vyrobených odlitků ve ŽDAS a.s. v letech 2001 až 2012, vyjma odlitků s obsahem chromu 9-20%

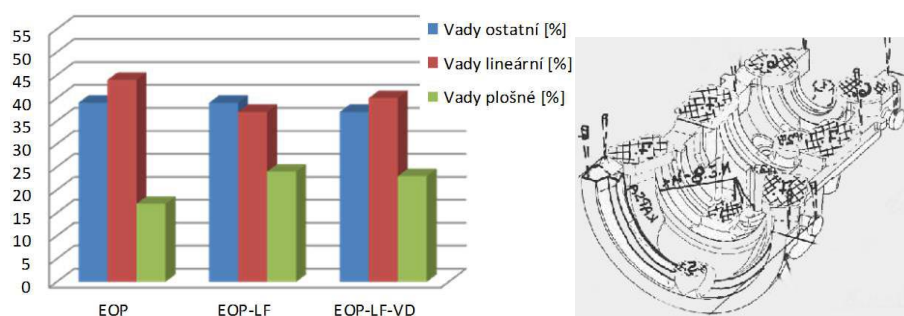
Ze všech typů odlitků bylo vybráno 80 typů, pro které byla ocel vyráběna u odlitků stejného typu různými způsoby. Konkrétně se jednalo o postupy EOP, EOP/LF, EOP/LF/VD. Ovšem ne pokaždé byly odlitky, u nichž byla ocel vyráběna na zařízeních sekundární metalurgie odlévány více než 1. To je důvodem, že byly data z taveb hodnoceny ve variantách měření bez i s opakováním [35].

Bylo prokázáno celkové snížení objemu vad, pokud byla ocel zpracovávána postupy sekundární metalurgie, oproti tavbám, které byly provedeny pouze na EOP. Pokud bylo použito postupu EOP/LF, bylo prokázáno snížení objemu vad o 24% oproti zpracování pouze na EOP. U taveb s měřením s opakováním se jednalo o pokles o 11%, kde tento údaj je možné brát jako věrohodnější. Pokud ocel prošla dále vakuovým zpracováním, tudíž se jednalo o výrobní postup EOP/LF/VD, byl objem vad snížen o 31%. Při měření s opakováním byl objem vad snížen o 21% [35].

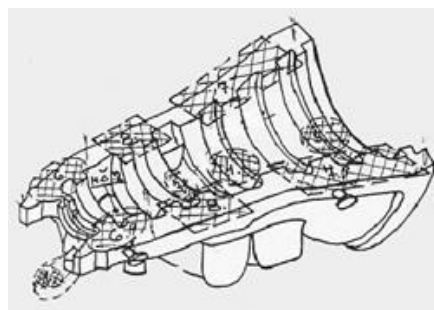
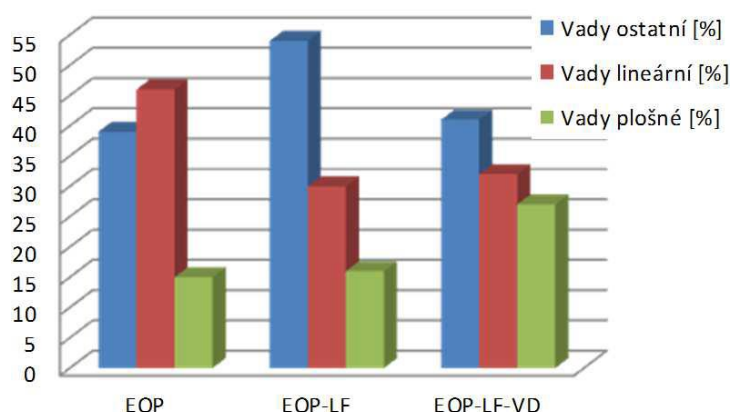
Na základě provozních dat byl prokázán přínos sekundární metalurgie na kvalitu ocelových odlitků [35].

U ocelí na odlitky vyráběných s přispěním sekundární metalurgie došlo také ke změně struktury typu vad odlitků oproti ocelím, které byly vyráběny bez použití sekundární metalurgie [35].

„Plošné vady“ byly definovány tak, že jejich hloubka nepřekračuje 5mm. Jako „lineární vady“ jsou brány vady, jejichž délka je třikrát a vícekrát větší než jejich šířka (trhliny). Jako „ostatní vady“ jsou brány ty vady, co nepatří ani do jedné z již uvedených skupin. Podíl jednotlivých typů vad byl porovnáván na příkladu odlitků spodku (obr. 17) a vršku (obr. 18) turbínové skříně [35].



Obr. 17. Podíl typů vad pro spodek turbínové skříně a jednotlivé metalurgické agregáty [35]

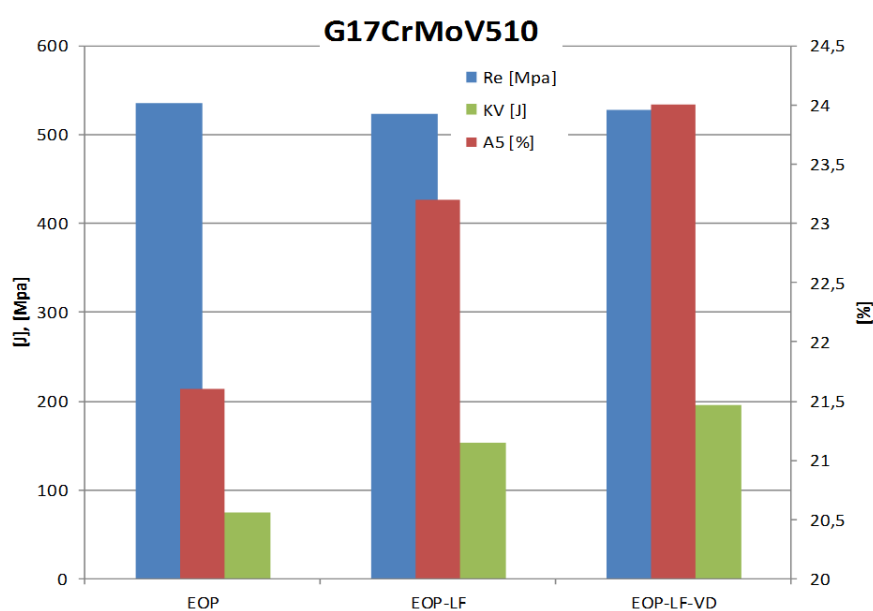


Obr. 18. Podíl typů vad pro vršek a turbínové skříně a jednotlivé metalurgické agregáty [35]

U odlitků spodku turbínové skříně klesl podíl „lineárních vad“ při zpracování oceli na odlitky sekundární metalurgií jenom nepatrně v porovnání s ocelí na odlitky zpracovanou na EOP. Podíl „plošných vad“ mírně narostl a podíl ostatních vad zůstal víceméně stejný. U odlitků vršku turbínové skříně klesl podíl „lineárních vad“ při zpracování oceli na odlitky sekundární metalurgií v porovnání s ocelí na odlitky zpracovanou na EOP. Což může vést ke snížení nákladů na opravy odlitků. Podíl „plošných vad“ vad narostl především u vakuového zpracování. U „ostatních vad“ narostl výrazněji jejich podíl pouze u postupu EOP/LF [34]. Více o vadách odlitků je možné nalézt v [36], [37], [38].

5.2.2 Vliv sekundární metalurgie na mechanické vlastnosti odlitků

Znázornění rozdílu výsledných hodnot mechanických vlastností bude provedeno na příkladu oceli G17CrMoV510. Tato ocel je běžně používaná pro výrobu turbínových skříní. U všech vyhodnocovaných postupů výroby oceli bylo provedeno standardní tepelné zpracování a výsledné hodnoty mechanických vlastností byly vyhodnocovány na zkušebním klínu tloušťky 60 mm [35]. Jakých hodnot mechanických vlastností bylo dosaženo, přehledně znázorňuje graf na obr. 19.



Obr. 19. Vliv použitého metalurgického postupu na mechanické vlastnosti oceli G17CrMoV510 [35]

Při zpracování oceli pouze na EOP bylo dosaženo průměrné meze kluzu 535 MPa, průměrné tažnosti 21,6% a průměrné hodnoty vrubové houževnatosti dosahovaly 75 J. U výrobního postupu EOP/LF byla zaznamenána průměrná mez kluzu 523 MPa, průměrná tažnost 23,2% a průměrná vrubová houževnatost 153 J. Při technologii EOP/LF/VD byla zjištěna průměrná mez kluzu 527 MPa, průměrná tažnost 24% a průměrná vrubová houževnatost 196 J [35].

Je možné říci, že použití sekundární metalurgie zlepšuje plastické vlastnosti oceli. Pevnostní vlastnosti oceli zůstávají u všech technologických procesů prakticky konstantní. Nejlepších plastických vlastností je dosaženo u výrobního postupu EOP/LF/VD. I u postupu EOP/LF bylo dosaženo podstatně vyšších hodnot vrubové houževnatosti než tomu bylo u zpracování oceli pouze na EOP. Dosažené výsledky u oceli G17CrMoV510 odpovídají i zkušenostem s dalšími ocelemi, které byly interně vyhodnocované ve ŽDAS a.s [35].

5.2.3 Vliv sekundární metalurgie na chemické složení oceli

Použití sekundární metalurgie umožňuje u některých prvků dosahovat takové koncentrace, které by nebylo možné při výrobě oceli pouze na EOP. V této práci bude hodnoceno chemické složení u ocelí G17CrMoV510 a G17CrMo55. Budou k tomu použity provozní data ze ŽDAS a.s., které byly zaznamenány od ledna 2010 až do srpna 2015. Hodnoceno je rozdílné chemické složení u výrobních postupů EOP, EOP/LF, EOP/LF/VD.

U oceli G17CrMoV510 jsou statistické údaje u jednotlivých prvků znázorněny v **tab. 5** pro výrobu oceli pouze na EOP, v **tab. 6** jsou zaznamenány údaje u postupu EOP/LF a v **tab. 7** jsou údaje z výroby realizované technologií EOP/LF/VD.

Tab. 5. Statistické údaje vybraných prvků při výrobě na EOP u oceli G17CrMoV510

prvky	C	Mn	Si	P	S	H	N
průměr	0,17	0,67	0,43	0,010	0,010	5,4	0,011
medián	0,17	0,67	0,43	0,010	0,010	5,4	0,011
min	0,15	0,60	0,33	0,005	0,004	2,9	0,006
max	0,19	0,75	0,50	0,014	0,015	8,0	0,015
směrodatná odchylka	0,007125	0,0293375	0,0315	0,0017	0,001888	0,982442	0,001677
rozsah	40	40	40	40	40	27	37

Tab. 6. Statistické údaje vybraných prvků při výrobě EOP/LF u oceli G17CrMoV510

prvky	C	Mn	Si	P	S	H	N
průměr	0,17	0,66	0,40	0,008	0,005	4,7	0,01
medián	0,17	0,66	0,40	0,007	0,005	4,7	0,01
min	0,16	0,63	0,38	0,006	0,002	4,1	0,01
max	0,18	0,70	0,42	0,011	0,007	5,2	0,01
směrodatná odchylka	0,005556	0,011667	0,011667	0,001667	0,001667	0,4	0,001256
rozsah	6	6	6	6	6	4	6

Tab. 7. Statistické údaje vybraných prvků při výrobě EOP/LF/VD u oceli G17CrMoV510

prvky	C	Mn	Si	P	S	H	N
průměr	0,17	0,64	0,38	0,009	0,002	1,1	0,005
medián	0,17	0,64	0,38	0,009	0,001	1,1	0,005
min	0,15	0,60	0,27	0,004	0,001	0,5	0,003
max	0,20	0,75	0,46	0,014	0,008	2,2	0,008
směrodatná odchylka	0,006702	0,017995	0,0176	0,001718	0,000715	0,197639	0,00062
rozsah	145	145	145	145	145	142	139

U vodíku jsou hodnoty v jednotkách ppm, u ostatních prvků v procentech obsahu v oceli. Jak je z těchto statistických znaků patrné, tak u uhlíku, manganu, křemíku a fosforu jsou hodnoty jednotlivých veličin u všech vyhodnocovaných výrobních postupů vesměs podobné. Ovšem u síry, vodíku a dusíku jsou již patrné výrazné rozdíly u jednotlivých postupů. U ocelí zpracovaných pouze na EOP je průměrná koncentrace těchto tří prvků nejvyšší. Nejvyšší je u těchto tří prvků i směrodatná odchylka. Oceli zpracované postupem EOP/LF vykazují ještě nižší průměrné koncentrace u těchto prvků, nižších hodnot nabývá i směrodatná odchylka. Což svědčí o větší stabilizaci tohoto výrobního procesu oproti tavbám uskutečňovaným pouze na EOP. Nejnižších hodnot průměrné koncentrace síry, vodíku a dusíku je dosahováno u technologického procesu EOP/LF/VD. Tento proces vykazuje i nejnižší směrodatnou odchylku. Dá se proto usuzovat, že je všech procesů nejstabilnější a u ocelových odlitků, které prošly tímto procesem, je možné očekávat také nejvyšší metalografickou čistotu.

U oceli G17CrMo55 jsou statistické údaje u jednotlivých prvků znázorněny v **tab. 8** pro výrobu oceli pouze na EOP, v **tab. 9** jsou zaznamenány údaje u postupu EOP/LF a v **tab. 10** jsou údaje z výroby realizované technologií EOP/LF/VD.

Tab. 8. Statistické údaje vybraných prvků při výrobě na EOP u oceli G17CrMo55

prvky	C	Mn	Si	P	S	H	N
průměr	0,18	0,72	0,38	0,010	0,010	5,4	0,010
medián	0,17	0,72	0,39	0,010	0,010	5,1	0,010
min	0,16	0,65	0,27	0,006	0,005	3,7	0,006
max	0,19	0,90	0,45	0,015	0,017	9,2	0,012
směrodatná odchylka	0,00831	0,0301276	0,032092	0,001741	0,00201	1,014533	0,001162
rozsah	56	56	56	56	56	17	20

Tab. 9. Statistické údaje vybraných prvků při výrobě EOP/LF u oceli G17CrMo55

prvky	C	Mn	Si	P	S	H	N
průměr	0,17	0,67	0,30	0,008	0,005	5,6	0,008
medián	0,17	0,67	0,30	0,008	0,006	5,4	0,007
min	0,16	0,66	0,27	0,005	0,001	4,6	0,007
max	0,17	0,69	0,33	0,011	0,009	6,8	0,009
směrodatná odchylka	0,0048	0,0088	0,0168	0,00184	0,0024	0,9	0,0008
rozsah	5	5	5	5	5	4	5

Tab. 10. Statistické údaje vybraných prvků při výrobě EOP/LF/VD u oceli G17CrMo55

prvky	C	Mn	Si	P	S	H	N
průměr	0,17	0,68	0,29	0,009	0,002	1,3	0,005
medián	0,17	0,68	0,28	0,009	0,002	1,1	0,004
min	0,16	0,65	0,23	0,006	0,001	0,5	0,003
max	0,19	0,74	0,38	0,014	0,012	6,8	0,010
směrodatná odchylka	0,005096	0,01712	0,025856	0,001576	0,026912	0,458333	0,000926
rozsah	50	50	50	50	50	49	44

U oceli G17CrMo55 jsou průměrné koncentrace uhlíku a fosforu u všech vyhodnocovaných technologií podobné. Mangan a křemík vykazují jisté rozdíly u průměrných koncentrací, nicméně se dá předpokládat, že koncentrace těchto prvků byla napočítána do požadovaného rozpětí daného normou, aby odpovídala danému technologickému postupu. Větší rozdíly v koncentraci daných prvků jsou opět patrné u síry, vodíku a dusíku. Je třeba zmínit, že u

procesu EOP/LF jsou k dispozici pouze 4 hodnoty. Proto nejsou statistické údaje u této technologie příliš relevantní. Kromě obsahu vodíku u technologického procesu EOP/LF jsou průměrné koncentrace síry, vodíku a dusíku a jejich směrodatné odchylky nejvyšší u výroby oceli na EOP, nižších hodnot je dosaženo u procesu EOP/LF a nejnižší hodnoty jsou zaznamenány u postupu EOP/LF/VD. Je možné říci, že tento trend je stejný jako u statistických znaků u oceli G17CrMoV510.

Je zřejmé, že při použití sekundární metalurgie dochází ke snížení koncentrace síry, vodíku a dusíku, které jsou u většiny typů oceli považovány za nežádoucí. Tento pokles je zvláště patrný při použití vakuové metalurgie. To má samozřejmě vliv i na užité vlastnosti oceli a její celkovou metalografickou čistotu.

I když pro tuto práci nebyly k dispozici metalografické výbrusy, je možné předpokládat, že zvláště u technologického procesu EOP/LF/VD má výrazné snížení obsahu síry u ocelí G17CrMoV510 a G17CrMo55, pozitivní vliv na čistotu oceli. Se sníženým obsahem síry je možné očekávat i snížení sulfidických a oxisulfidických vměstků. Jelikož pouze 5% z celkového obsahu síry v oceli je rozpuštěno v oceli, zatímco zbylých 95% je vázáno na sulfidy, případně oxisulfidy [23]. Závislost mezi snižujícím se obsahem síry a poklesem množství sulfidů v oceli je uvedeno v práci [39].

Se sníženým obsahem vodíku lze také očekávat zlepšení plastických vlastností oceli a snížení rizika vzniku bublin v odlitcích. A s poklesem obsahu dusíku klesá riziko vzniku bublin a v masivních odlitcích i lasturových lomů.

ZÁVĚR

Se zavedením sekundární metalurgie, ať již do ocelářenských či slévárenských provozů, vždy přichází změna technologie výroby oceli a celková změna organizace práce. Nehledě na to, že je také zapotřebí zaškolit obsluhu pro zařízení sekundární metalurgie.

Ve slévárnách a ingotárnách typu ŽDAS a.s. se osvědčila technologie výroby oceli, kde se EOP využívá ve většině případů pouze k natavení a k oxidačnímu údobí. Zbylé fáze tavby jsou potom již realizované mimo EOP.

Potom tavba může vypadat tak, že v EOP je roztavena vsázka, provedena oxidace. Po odpichu z EOP jsou do pánve nahozeny dezoxidační přísady a celý proces pokračuje na LF, kde dojde k úpravě chemického složení a k tepelné a chemické homogenizaci oceli. Poté je ocel zpracovávána dle potřeby některým postupem na zařízení vakuové metalurgie (VD/VOD/VCD), podle toho o jaký typ oceli se jedná. Po vakuování je možný ještě příhřev kovu na LF, aby bylo dosaženo požadované lící teploty. Jak je patrné, způsob tavby se potom výrazným způsobem liší od klasické tavby na EOP.

Změna technologie má v tomto případě podstatný vliv na změnu chemického složení a s ní souvisejících vlastností oceli. Jak je zřejmé z poslední kapitoly, zpracování oceli na zařízeních sekundární metalurgie vede ke snížení koncentrace síry, kyslíku, vodíku a dusíku. K poklesu také došlo u celkového objemu vad. I změna struktury typů vad je pozitivní, z hlediska toho, že ubylo celkového podílu trhlin, které se pracněji opravují. Tím pádem se kvůli tomu i zvyšují náklady na opravu odlitků. Dalším pozitivním efektem je nárůst tažnosti a vrubové houževnatosti.

Práce by dále mohla být rozšířena o analýzu metalografických výbrusů, které by byly opět rozděleny podle jednotlivých technologických procesů, jako tomu bylo v poslední kapitole. Kde by bylo možné prokázat zvýšení oxidické čistoty oceli. Analýza výbrusů by také mohla ukázat jaké je rozmístění a typ vměstků v oceli. Dále by mohla být provedena i analýza makrostruktury. Což by mohlo lépe vyobrazit jaký vliv má použití sekundární metalurgie na výslednou kvalitu oceli.

Také by mohlo být provedeno ekonomické zhodnocení zavedení sekundární metalurgie. A to jak z dlouhodobého hlediska, tak i dle rozdílných nákladů na konkrétní tavbu u určitého typu oceli. Vliv sekundární metalurgie by tak mohl být zhodnocen i z jiného hlediska. Tyto zmíněné možnosti rozšíření by mohly do budoucna sloužit jako podklad pro téma diplomové práce.

Z této práce lze usoudit, že použití sekundární metalurgie má ve skrze pozitivní vliv na výslednou kvalitu oceli.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HÄNTZSCHEL-CLAIRMONT, Walter, Hans BENTE a Richard EMHARDT. *Stavba strojů v praxi*. 18., do češtiny přeložené a dopl. vyd. Praha: [s.n.], 1932, 1 sv.
2. PARMA, Václav. *Ocelářství II*. 3. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1991, 186 s.
3. FREMUNT, Přemysl a Jaroslav ŠIMON. *Tavení oceli v elektrických pecích*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 242 s.
4. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIAM, c2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
5. BŮŽEK, Zdeněk. K intenzifikaci výroby oceli v elektrických obloukových pecích. *Slévárenství*. Brno, 2006, **54**(6), 198-206. ISSN 037-6825.
6. Fila, P. a kol. (2012): První zkušenosti s multifunkčním kopím ve ŽĎAS, a.s. In 49. slévárenské dny, Sborník přednášek – sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty. Brno: Česká slévárenská společnost. 6.–7. 2012. Brno, s. 37–42. ISBN 978-80-02-02405-7.
7. MYSLIVEC, Theodor. *Fyzikálně chemické základy ocelářství: určeno [těž] pro studenty vysokých a středních odborných škol*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. Řada hutnické literatury.
8. ZEMČÍK, Ladislav. *Fyzikální metalurgie*. Brno: VUT Brno, 1990. ISBN 80-214-0248-2.
9. ADOLF, Zdeněk. *Teorie procesů při výrobě železa a oceli*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3579-2.
10. BŮŽEK, Zdeněk. *O teorii a praxi desoxidace elektrooceli*. Praha: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1973. Hutnické aktuality (Výzkumný ústav hutnictví železa).
11. Carbol, Z., Machovčák, P. (2012): Sekundární metalurgie při výrobě masivních odlitků ve VHM a.s. In 49. slévárenské dny, Sborník přednášek – sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty. Brno: Česká slévárenská společnost. 6.–7. 2012. Brno, s. 18–22. ISBN 978-80-02-02405-7.
12. ADOLF, Zdeněk. *Mimopecní rafinace oceli*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1988, 130 s.
13. KARNOVSKÝ, Miloš, Miroslav MANDL a M. ČERVINKA. *Syntetické rafinační strusky*. Praha: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1964. Hutnické aktuality (Výzkumný ústav hutnictví železa).
14. JEDNERAL, F. P. *Elektrometalurgia ocele a ferozliatin*. Bratislava: Alfa, 1981. Edícia hutníckej literatúry (Alfa).
15. MARTÍNEK, L., J. ŠENBERGER, P. FILA a M. BALCAR. Sekundární metalurgie ve slévárnách. *Slévárenství*. Brno, 2006, **54**(6), 218-221. ISSN 037-6825.
16. BAIL, V., P. TOMIS, T. UHER, V. KAFKA a M. PETER. *Náběh integrovaného systému sekundární metalurgie* [online]. In: . [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/158.pdf
17. ESPE, W., B. OSTRČIL, J. VACEK, M. MAMULA a P. HIX. *Vakuová technika v metalurgii: [sborník referátů] : určeno technikům a inženýrům v hutnictví, slévárenství, strojírenství a elektrotechnice*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Řada hutnické literatury.
18. KNÜPPEL, H.: *Desoxidation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen*. Band 1. Düsseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H., 1970.

19. PARMA, Václav a Jaroslav BEČVÁŘ. *Sekundární metalurgie při výrobě oceli*. Praha: Informetal, 1983, 53 s. Hutnické aktuality (Infometal).
20. MITURA, Karel a Svatava LANDOVÁ. *Vměstky v oceli a jejich vliv na užité vlastnosti oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
21. KEPKA, Miloslav. *Ovlivňování čistoty oceli*. Praha: Academia, 1986. Studie ČSAV.
22. PECINA, Vladimír. *Vliv aktivity kyslíku, během tavby a odlévání, na metalurgickou jakost slitin železa: Influence of oxygen activity, during melt and casting, on metallurgical quality of ferrous alloys : zkrácená verze doktorské práce*. [Brno: Vysoké učení technické v Brně], c2010. ISBN 978-80-214-4130-9.
23. ŽÍDEK, Milan. *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha: Aleko, 1995. ISBN 80-853-4145-X.
24. JAREŠ, Vojtěch. *Ocel*. 7. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958.
25. SCHINDLER, Ivo. *Metalurgická tvařitelnost: (učební texty ke kvalifikačnímu kurzu)*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1997. ISBN 80-707-8476-8.
26. ŽĐAS, kovací lis. *Viktor Mácha-dokumentace těžkého průmyslu* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://viktormacha.com/galerie/zdas-zdar-nad-sazavou/zdas-kovaci-lis-661.html>
27. *Průručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
28. ADAMEC, Jaromír (ed.). *Obrobitelnost strojírenských materiálů*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 1998. Strojírenská technologie. ISBN 80-704-4232-8.
29. Obrobitelnost-definice. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition/pages/default.aspx?Country=cz
30. Svařitelnost materiálů. *ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY-Akademie věd České republiky* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/svaritelnost-materialu>
31. HRIVŇÁK, Ivan. *Zvaritel'nost' ocelí*. Bratislava: Alfa, 1979. Edícia strojárskiej literatúry (Alfa).
32. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
33. BALCAR, Martin. Sekundární metalurgie a kyslík v oceli. In: *49. slévárenské dny, Sborník přednášek – sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2012, s. 23-29. ISBN 978-80-02-02405-7.
34. FILA, P., M. BALCAR, J. SVATOŇ, L. MARTÍNEK a V. ŠVÁBENSKÝ. *VLIV ZPŮSOBU ODBĚRU VZORKU TEKUTÉ OCELI NA OBSAH* [online]. In: . [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_08/Lists/Papers/121.pdf
35. ČECH, Jan. Vliv sekundární metalurgie na kvalitu ocelových odlitků. In: *Sborník přednášek z 51. slévárenských dnů-Blok A - Sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2014, s. 5-11. ISBN 978-80-02-02566-5.

36. PŘIBYL, Josef. *Vady ocelových odlitků: určeno stř. a vyš. technickým kádrům ve slévárnách oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. Řada strojírenské literatury.
37. LEVÍČEK, Petr a Karel STRÁNSKÝ. *Metalurgické vady ocelových odlitků: (příčiny a odstraňování)*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
38. ČECH, Jaroslav. *Vady a kontrola odlitků*. Brno: Vysoké učení technické, 1987.
39. ŠENBERGER, J. a L. MARTÍNEK. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli-II. část. Injektáž prachových látek do pánve za účelem odsíření a modifikace vměstků. *Slévárství*. Brno, 1999, **47**(10), 578-583.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CO	[-]	oxid uhelnatý
EOP	[-]	Elektrická Oblouková Pec
EIP	[-]	Elektrická Indukční Pec
Al ₂ O ₃	[-]	oxid hlinitý
CaO	[-]	oxid vápenatý
CO ₂	[-]	oxid uhličitý
SiO ₂	[-]	oxid křemičitý
Si	[-]	křemík
O	[-]	kyslík
Fe	[-]	železo
P	[-]	fosfor
Ca	[-]	vápník
FeO	[-]	oxid železnatý
Fe ₂ O ₃	[-]	Oxid železitý
S	[-]	síra
AOD	[-]	Argon Oxygen Decarburisation
CLU	[-]	Creusot Loire Udelholm
IP	[-]	Injection Process
SL	[-]	Scandinavian Lancers
LF	[-]	Ladle Furnace (pánvová pec)
VD	[-]	Vacuum Degassing
VOD	[-]	Vacuum Oxygen Decarburisation
RH	[-]	Rührstahl Heraeus

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
DH	[-]	Dortmund Hütteunion
Tav	[-]	tavenina
γ	[-]	γ - železo
δ_3	[-]	δ - železo
A ₁	[-]	eutektoidní teplota systému železo – uhlík
A ₃	[-]	křivka vymezující dolní hranici oblasti stability austenitu při obsahu uhlíku nižším než 0,8%
FeS	[-]	sulfid železnatý
MnS	[-]	sulfid manganatý
AVG	[-]	průměrná hodnota (koncentrace)